

# Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 669.017

ГРНТИ 53.49.05; 53.49.09; 53.49.21

Инв. №

<b>УТВЕРЖДЕНО:</b>
Исполнитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»
От имени Руководителя организации Кокшаров В.А./ М.П.

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

о выполнении 6 этапа Государственного контракта  
№ 16.740.11.0505 от 16 мая 2011 г. и Дополнению от 15 марта 2013 г. № 1

Исполнитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.

Проект: Теоретические основы и экспериментальные решения получения сплавов из коррозионностойких материалов с особыми заданными физико-механическими свойствами для приборостроения, точного машиностроения, атомной энергетики и композитов

Руководитель проекта:



(подпись)

/ Мальцева Людмила Алексеевна

Екатеринбург  
2013 г.



# СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту 16.740.11.0505 от 16 мая 2011 на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»

Руководитель темы:

доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Мальцева Л. А.  
подпись, дата

Исполнители темы:

доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Логинов Ю. Н.  
подпись, дата

кандидат технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Буркин С. П.  
подпись, дата

доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Грачев С. В.  
подпись, дата

кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Михайлов С. Б.  
подпись, дата

кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Мальцева Т. В.  
подпись, дата

кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Озерец Н. Н.  
подпись, дата

кандидат технических наук, без ученого звания \_\_\_\_\_ Шарапова В. А.  
подпись, дата

кандидат технических наук, без ученого звания \_\_\_\_\_ Ишина Е. А.  
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания \_\_\_\_\_ Ложкин Н. Н.  
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания \_\_\_\_\_ Пастухов М. В.  
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания \_\_\_\_\_ Левина А. В.  
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания \_\_\_\_\_ Храмцова К. Д.  
подпись, дата

без ученой степени, без ученого звания	_____	Тюшляева Д. С.
	подпись, дата	
без ученой степени, без ученого звания	_____	Шимов Г. В.
	подпись, дата	
без ученой степени, без ученого звания	_____	Скорынина П. А.
	подпись, дата	
без ученой степени, без ученого звания	_____	Курочкин О. Д.
	подпись, дата	
без ученой степени, без ученого звания	_____	Третникова М. П.
	подпись, дата	
кандидат технических наук, доцент	_____	Логинова И. В.
	подпись, дата	
без ученой степени, без ученого звания	_____	Шалаева М. С.
	подпись, дата	

## Реферат

Отчет 72 с., 1 ч., 57 рис., 9 табл., 28 источн., 0 прил.

композиционный материал , сварка взрывом , многослойный металлический композит , переходная зона , поверхность раздела , зона перемешивания , приграничный слой , мартенсит , дуралюмин

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 6 этапу Государственного контракта № 16.740.11.0505 "Теоретические основы и экспериментальные решения получения сплавов из коррозионностойких материалов с особыми заданными физико-механическими свойствами для приборостроения, точного машиностроения, атомной энергетики и композитов" (шифр "2011-1.2.1-207-008") от 16 мая 2011 по направлению "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук в следующих областях:- нанотехнологии и наноматериалы;- механотроника и создание микросистемной техники;- создание биосовместимых материалов;- создание и обработка композиционных и керамических материалов;- создание и обработка кристаллических материалов;- создание и обработка полимеров и ластомеров;- создание мембран и каталитических систем; - металлургические технологии;- строительные технологии" в рамках мероприятия 1.2.1 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук.", мероприятия 1.2 "Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук и кандидатов наук", направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Решение проблемы создания, изучения и использования ультрамелкоструктурного состояния в принципиально новых металлических сплавах, применяемых в качестве особопрочных коррозионностойких металлических материалов с широким спектром физико-химических и физико-механических свойств для упругих элементов с различной функциональной направленностью, обусловленной конкретной областью применения и высоким уровнем прочности и пластичности в тончайших сечениях, а также на повышение стойкости против МКК холоднодеформированных изделий из нержавеющей сталей для атомных реакторов современных АЭС.

Решение поставленных задач базируется на привлечении современных методов физического металловедения. Исследование возможностей заключенных в различных способах термопластического упрочнения изделий тонких размеров реализованы с помощью проведения рентгеноструктурного фазового анализа, световой и электронной микроскопии, определения упругих свойств, оценки прочности и пластических свойств, испытания на стойкость к релаксации напряжений.

В распоряжении коллектива имеется оборудование лаборатории структурных



методов анализа и свойств материалов и наноматериалов центра коллективного пользования УрФУ: испытательная машина Instron 3382 для исследования механических свойств, как на проволочных, так и на стандартных образцах, микроскоп Olimpus JX51; рентгеновский дифрактометр ДРОН-3, растровый электронный микроскоп Philips SEM 535 с приставкой Jeol JSM 6490-LV с системой микроанализа Oxford Instruments Inca Energy 350; электронные микроскопы УЭМ15-100К, Тесла 740, установки для измерения модуля упругости, металлографические микроскопы, твердомеры, испытательная машина для механических испытаний 1246Р с вакуумной камерой, электронный сканирующий микроскоп Тесла BS-340.

Таким образом, проведенное исследование полученных сваркой взрывом композитов из различных материалов показало, что сварка взрывом является технологическим процессом, позволяющим соединять разнородные материалы. На основании структурных исследований можно сделать вывод о высоком качестве сварных швов. В процессе сварки металлические материалы претерпевают существенные структурные изменения, к которым относится интенсивная пластическая деформация приграничных слоев и образование новых фаз. На границе разнородных материалов в переходной зоне наблюдается интенсивное перемешивание, приводящее к изменению химического состава материала, иногда с образованием новых интерметаллидных фаз.

Изучение структуры и свойств металлических композиционных материалов после различных методов твердофазного совмещения с помощью МРСА, рентгеноструктурного фазового анализа, электронно-микроскопического метода, дилатометрии, ДСК, с привлечением магнитных и физических свойств позволило сделать следующие выводы:

1. Отработан режим сварки, включающий выбор взрывчатого вещества и толщину его слоя, конфигурацию устройства, параметры детонации и соударения.
2. Изучены процессы, протекающие в исследуемых композиционных материалах на межфазных границах.
3. Установлено, что в процессе сварки взрывом через границу раздела происходит интенсивный массоперенос как посредством деформации волнообразования с образованием множества микровыступов одного материала в другой на образующейся волнообразной границе, так и посредством расплавления материалов на границе. Такая закономерность наблюдается в композитах: III, IV, V, VI. А в композитах I и II поверхность границ была практически ровная.
4. Структурные исследования и испытания на перегиб свидетельствуют о высоком качестве сварного соединения. Прочность полученных композитов превышает прочность матриц.
5. МРСА в композите V выявили на межфазной границе между дюралю и сталью кроме зоны перемешивания существование тонкой прослойки интерметаллидного соединения типа  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ , а в слое дюрала наблюдали присутствие интерметаллидной фазы  $\text{CuAl}_2$ , полученной, по-видимому, при кристаллизации зоны расплавления.

## Содержание

Введение.....	7
Получение металлических композиционных материалов (МКМ) методами твердофазного совмещения: диффузионная сварка, сварка взрывом, прокатка. Отработка технологии получения МКК, изучение физико-механических свойств по технологическим этапам .....	9
1. Классификация КМ.....	9
1.1. Способы получения слоистых МКМ.....	12
1.2. Состояние на межфазной границе .....	27
1.3. Свойства слоистых металлических композитов .....	31
2. Изучение структуры и свойств металлических композиционных материалов после различных методов твердофазного совмещения с помощью МРСА, рентгеноструктурного фазового анализа, электронно-микроскопического метода, дилатометрии, ДСК, с привлечением магнитных и физических свойств .....	33
2.1. Материал и методы исследования.....	33
2.2. Результаты эксперимента и их обсуждение .....	44
Заключение .....	68
Список использованных источников .....	70

## Введение

Традиционно применяемые металлические и неметаллические материалы в значительной мере достигли своего предела конструктивной прочности. Вместе с тем развитие современной техники требует создания материалов, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, при воздействии агрессивных сред, излучений, глубокого вакуума и высоких давлений. Зачастую требования, предъявляемые к материалам, могут носить противоречивый характер. Удовлетворить эти требования можно путем использования композиционных материалов [1].

Композиционные материалы (КМ) обладают комплексом свойств, отличающихся от традиционных конструкционных материалов, что и предопределило их успешное применение для совершенствования современных и разработки принципиально новых конструкций. Композиционными называют материалы, состоящие из двух компонентов и более, объединенных различными способами в монолит и сохраняющими при этом индивидуальные особенности [2].

КМ позволяют иметь заданное сочетание разнородных свойств: высокой удельной прочности и жесткости, жаропрочности, износостойкости, усталостной прочности, теплозащитных свойств и др. Разнообразие свойств КМ невозможно получить при использовании обычных материалов. Их применение дает возможность создавать ранее недоступные принципиально новые конструкции [3].

К недостаткам металлических КМ относится их сравнительно высокая стоимость и сложность изготовления. Их стоимость в настоящее время превосходит стоимость полимерных КМ в несколько раз. Совершенствование технологии позволит снизить себестоимость металлических КМ, а их уникальные свойства делают их незаменимыми в ряде конструкций [1].

Свойства КМ в основном зависят от физико-химических свойств компонентов и прочности связи между ними. Отличительной особенностью КМ

является то, что в них проявляются достоинства компонентов, а не их недостатки. Вместе с тем, КМ присущи свойства, которыми не обладает отдельно взятые компоненты, входящие в их состав. Для оптимизации свойств композиций выбирают компоненты с резко отличающимися, но дополняющими друг друга свойствами [4].

Области использования металлических КМ непрерывно расширяются. Помимо улучшения технических характеристик многих ответственных изделий, использование металлических КМ способно обеспечить 20-30 %-ю экономию массы. Современные Al-Li сплавы имеют этот показатель на уровне 10-15%.

Благодаря КМ стал возможен новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, уменьшении массы машин и конструкций и повышении весовой эффективности транспортных средств и авиационно-космических аппаратов [1].

Тенденцию к все возрастающему использованию металлических слоистых материалов обуславливают экономию в стоимости, улучшенные свойства или работоспособность и сохранение дорогих и редких металлов. Быстрый прогресс в промышленности и технологии защиты материалов, а также постоянно растущая необходимость контроля загрязнения окружающей среды, требуют расширенного использования металлических слоистых материалов с целью сохранения ресурсов редких металлов. Металлические слоистые композиции становятся важнейшими материалами в современном обществе с высокоразвитой техникой [5].

Изучению структуры и свойств металлических композиционных материалов после различных методов твердофазного совмещения с помощью МРСА, рентгеноструктурного фазового анализа, электронно-микроскопического метода, дилатометрии, ДСК, с привлечением магнитных и физических свойств уделено основное внимание в данном разделе работы.

# **Получение металлических композиционных материалов (МКМ) методами твердофазного совмещения: диффузионная сварка, сварка взрывом, прокатка. Отработка технологии получения МКК, изучение физико-механических свойств по технологическим этапам**

## **1. Классификация КМ**

КМ состоят из сравнительно пластичного матричного материала и более твердых и прочных компонентов, являющихся наполнителями. Свойства КМ зависят от свойств основы, наполнителей и прочности связи между ними.

Матрица связывает композицию в монолит, придает ей форму и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают:

- КМ с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ);
- КМ с полимерной – полимерные композиционные материалы (ПКМ);
- КМ с керамической – керамические композиционные материалы (ККМ);
- углерод-углеродные (УУКМ);
- гибридные (ГКМ): полиматричные и поливолоконистые.

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, часто называемые упрочнителями. Они имеют высокую прочность, твердость и модуль упругости.

Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и ее эксплуатационные характеристики: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

КМ классифицируют по геометрии наполнителя, расположению его в матрице и природе компонентов.

По геометрии наполнителя КМ подразделяют на три группы (рис. 1):

- с нуль-мерными наполнителями, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок;



- с одномерными наполнителями, один из размеров которых превосходит два других;
- с двухмерными наполнителями, два размера которых значительно превосходят третий.

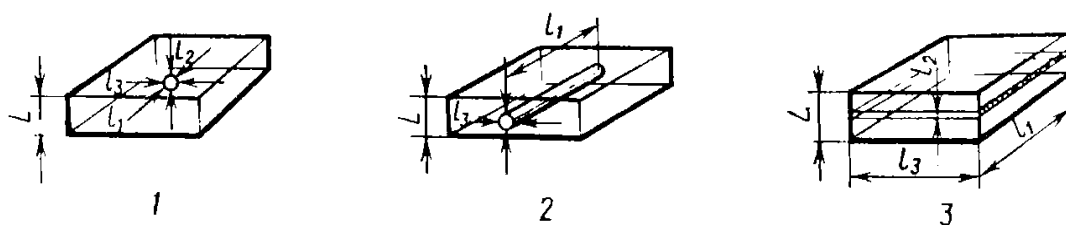


Рис.1. Классификация КМ по форме наполнителя

По схеме расположения наполнителей выделяют три группы КМ (рис. 2):

- с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу (рис. 2, а);
- с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя в виде волокон, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях (рис. 2, б);
- трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его распределении (рис.2, в).

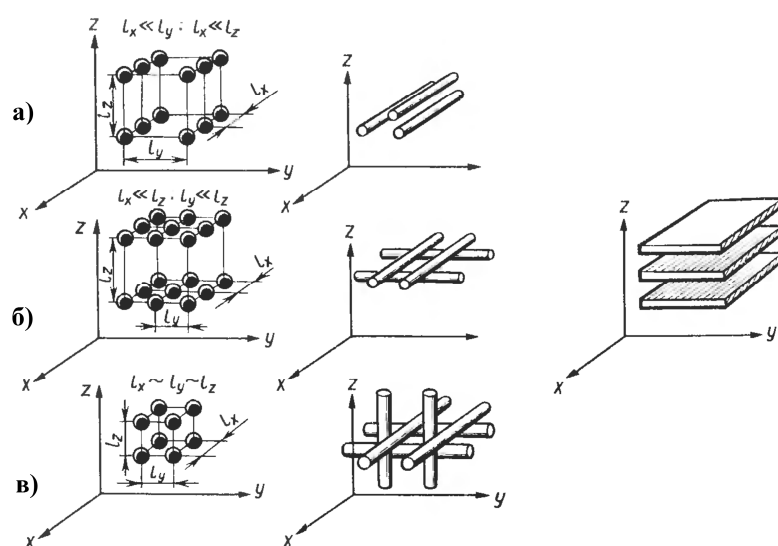


Рис. 2. Схемы армирования волокнистых и слоистых КМ

По типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяются на дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые (рис. 3) [3].

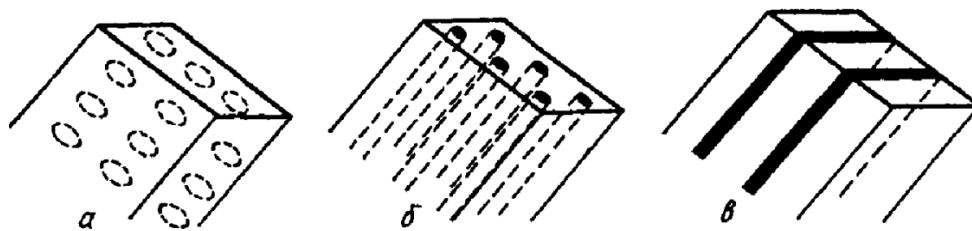


Рис. 3. Схемы строения КМ:  
*a* – дисперсно-упрочненные; *б* – волокнистые; *в* – слоистые.

Дисперсно-упрочненные композиты представляют собой материал, в матрице которого равномерно распределены мелкодисперсные частицы второго вещества. В таких материалах при нагружении всю нагрузку воспринимает матрица, в которой с помощью множества практически нерастворяющихся в ней частиц второй фазы создается структура, эффективно сопротивляющаяся пластической деформации [6]. В дисперсно-упрочненных КМ искусственно вводят мелкие равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и др., не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между ними, тем прочнее КМ [1].

У волокнистых композитов матрица (чаще всего пластичная) армирована высокопрочными волокнами, проволокой, нитевидными кристаллами. Идея создания волокнисто-армированных структур состоит не в том, чтобы исключить пластическое деформирование матричного материала, а в том, чтобы при его деформации обеспечивалось нагружение волокон и использовалась бы их высокая прочность [6]. Армирование волокнистых КМ может осуществляться по одноосной, двухосной и трехосной схеме. Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Армирование дает большой прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо.

Слоистые композиционные материалы набираются из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа «сэндвич»). Слои

наполнителя в таких КМ могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами [1].

### **1.1. Способы получения слоистых МКМ**

В МКМ сочетаются достоинства конструкционных металлических материалов с достоинствами композитов вообще. Для них характерны высокие значения прочностных характеристик, модулей упругости, вязкости разрушения, ударной вязкости; эти материалы сохраняют стабильность своих характеристик в более широких температурных интервалах, чем материалы с полимерными матрицами; они обладают также высокой тепло- и электропроводностью, малой чувствительностью к тепловым ударам и поверхностным дефектам. Им свойственны воспроизводимость характеристик, обусловленная этим же качеством конструкционных металлических материалов, в сочетании с высокой технологичностью, а также высокие значения временного сопротивления при растяжении в направлении, нормальном к оси волокон, прочности при сдвиге. Последние из перечисленных достоинств позволяют в большинстве случаев применять наиболее простую одноосную схему армирования; гораздо менее распространены схемы послойно-перекрестного (ортогонального или более сложного характера плоского армирования) расположения волокон.

Металлические матрицы обладают высокой реакционной способностью в жидкофазном состоянии и высоким сопротивлением деформированию в твердофазном состоянии, поэтому проблемы химической и механической совместимости для композитов этого типа весьма серьезны, их решение требует комплексных подходов, тщательной научной и практической проработки процессов. Для конструкционных композитов преобладающими являются твердофазные процессы, когда матрица находится в состоянии высокой пластичности и ограниченной реакционной способности.

Классификация процессов получения и обработки МКМ представлена на рис. 4. Процессы, относящиеся к газо- и парофазной, а также химической и

электрохимической группам, используются главным образом для нанесения технологических покрытий на волокна [6].

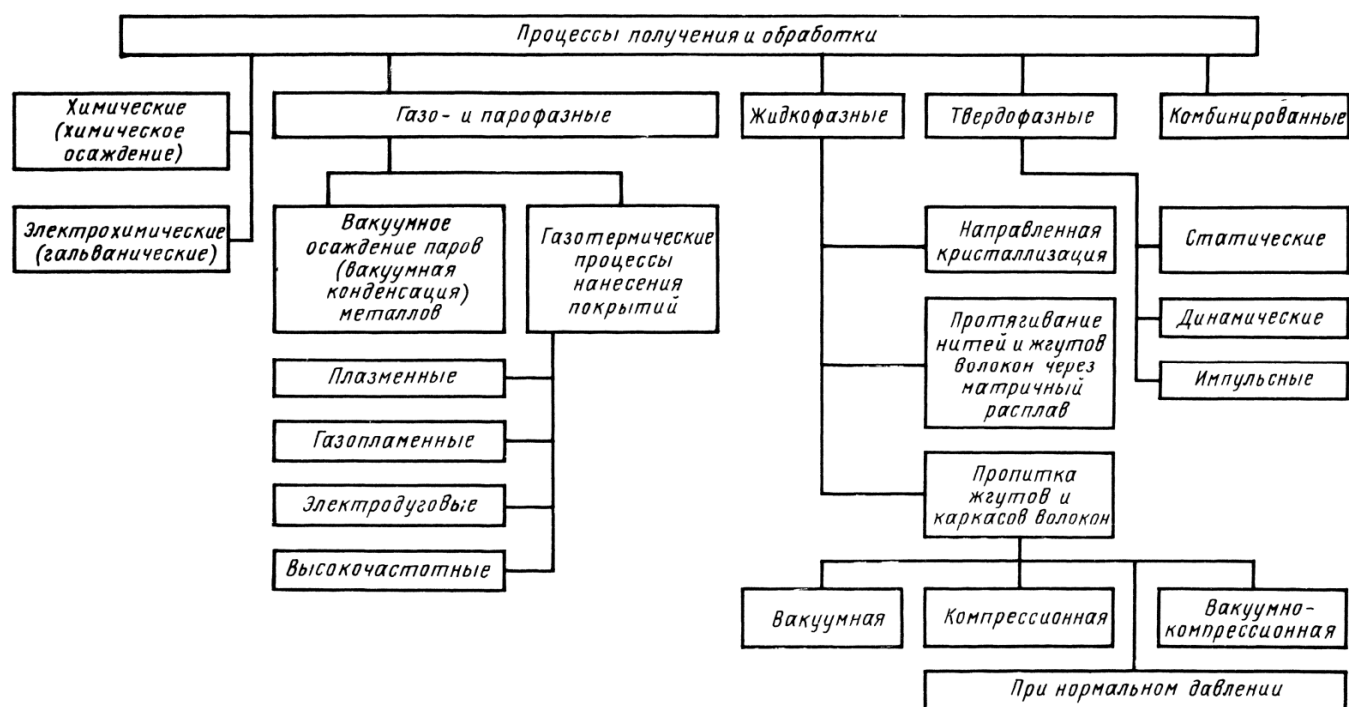


Рис. 4. Общая классификация процессов получения и обработки МКМ

Отличительной особенностью газофазных, химических и электрохимических методов получения КМ является отсутствие или незначительное температурное или механическое воздействие на волокна в процессе совмещения их с матрицей, а также возможность формирования изделий или полуфабрикатов сложной конфигурации.

Газофазные методы изготовления деталей используют для получения МКМ путем газотермического напыления матричного материала на упрочняющие волокна или осаждения матричного материала из газовой фазы. Газофазные методы используют для изготовления КМ, в которых не допускается взаимодействие упрочнителя с жидким матричным материалом. Эти методы могут быть применимы при получении композиции следующих систем: алюминиевая матрица – борные волокна; никелевые сплавы – углеродные волокна; нитевидные кристаллы тугоплавких соединений – металлы и др.

Жидкофазные процессы получения КМ заключаются в пропитке упрочняющих волокон или нитевидных кристаллов, расположенных в определенной последовательности или беспорядочно, расплавов материала матрицы. В качестве основных достоинств метода пропитки отмечаются:

- возможность получения изделий сложной формы;
- повышенная производительность труда;
- слабое силовое воздействие на хрупкие компоненты композита;
- возможность использования жгутовых и тканых армирующих материалов;
- возможность максимальной автоматизации и реализации непрерывных технологических процессов.

Недостатки технологии следующие:

- сравнительно высокие температуры нагрева материалов;
- необходимость строгого регулирования степени взаимодействия жидкой и твердой фазы в ходе технологического цикла;
- ограниченность круга компонентов в связи с необходимостью смачивания и большой разницей в температурах плавления.

Методы получения КМ различаются между собой условиями пропитки волокон расплавом, проходящей:

- при нормальном давлении;
- в условиях вакуума (вакуумное всасывание);
- под давлением;
- в сочетании элементов вакуумной пропитки и литья под давлением.

К жидкофазному процессу следует отнести и метод получения композиции направленной кристаллизацией из расплавов эвтектического состава. Важнейшим моментом получения качественного КМ пропиткой является хорошая смачиваемость упрочняющих волокон расплавом матрицы. Возможность метода значительно ограничивается высокой реакционной способностью материалов волокон в контакте с металлическими расплавами. Однако некоторые композиты можно получить лишь методом пропитки, применение других методов для них либо невозможно, либо нерационально [4].



В зависимости от условий обеспечения смачиваемости системы армирующий каркас – расплав материала матрицы применяют две схемы пропитки: самопроизвольную пропитку и пропитку под давлением. Самопроизвольную пропитку осуществляют путем заливки расплавленного материала в форму с уложенным в ней каркасом из армирующих волокон.

Наиболее перспективным и производительным является способ непрерывной протяжки армирующих каркасов через расплав материала матрицы. По этой схеме разрабатываются технологические процессы непрерывного литья полуфабрикатов из КМ. Принципиальные преимущества этого способа производства КМ – в его непрерывности, малом времени контактирования волокон с расплавом, малых трудозатратах и капиталовложениях. Перспективной считается вертикальная схема пропитки, при которой волокна, ленты, препреги проходят через ванну с расплавом и на выходе через фильеру получают форму сечения полуфабриката (рис. 5) [7].

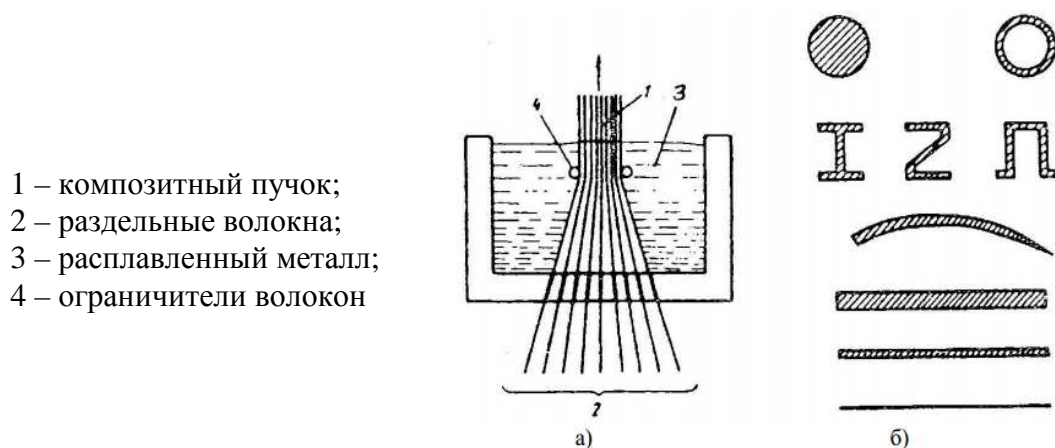


Рис. 5. Схема получения полуфабриката композиционного материала с металлической матрицей: а – схема процесса непрерывной пропитки жидким металлом; б – получаемые профили полуфабрикатов

Поэтапное сужение сечения фильеры на выходе позволяет получать полуфабрикаты с высоким объемным содержанием армирующих волокон. Принудительную пропитку обычно используют при недостаточной смачиваемости в системе матрица – волокно или для ускорения процесса пропитки для компонентов с удовлетворительной и хорошей смачиваемостью.

Наибольшее развитие при производстве конструкционных МКМ получили твердофазные процессы. На рис. 6 представлена классификация процессов этой группы [6].

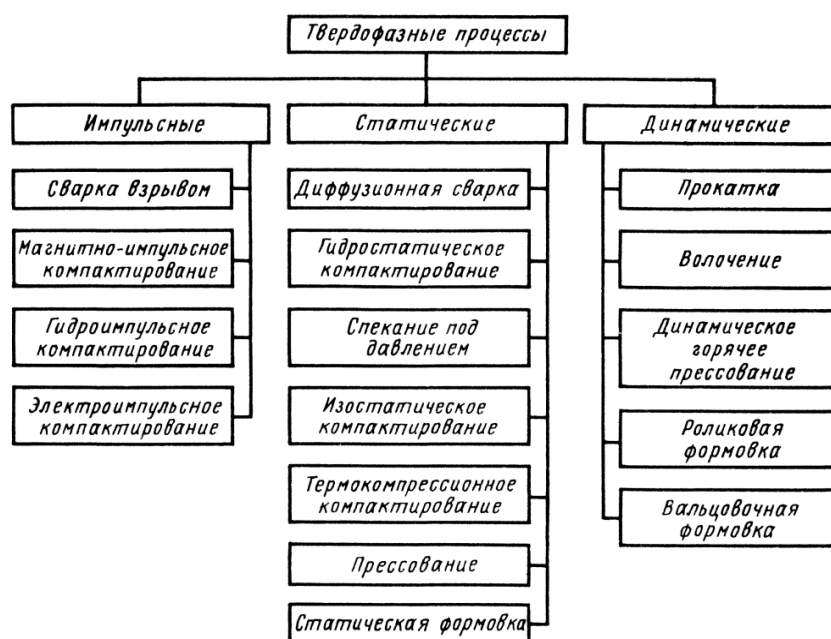


Рис. 6. Твердофазные процессы получения и обработки МКМ

Твердофазный метод совмещения компонентов композиции предполагает использование материала матрицы в виде листов, фольги, проволоки или порошка. МКМ получают одним из приемов: диффузионной сваркой под давлением, сваркой взрывом, деформационной обработкой под давлением, прессованием с последующим спеканием (порошковой металлургией) [3].

Процессы компактирования композитов с металлической матрицей разделяются на статические и динамические. К статическим процессам относятся такие виды компактирования, как спрессовывание по схеме диффузионной сварки, сварки давлением при горячем прессовании, гидростатическое прессование, изостатическое компактирование и др. К динамическим процессам компактирования относятся прокатка, волочение, динамическое горячее прессование [8].

Промышленные слоистые металлические материалы изготавливаются различными методами, основными из которых являются соединения пластин прокаткой, прессование биметаллических профилей и сварка взрывом [5].

## **Получение МКМ методом прокатки**

Одним из наиболее производительных является метод получения МКМ, основанный на прокатке заготовок. Технология прокатки позволяет получать так называемые естественно-композиционные материалы. Также можно получать прокаткой двухслойные, трехслойные и пятислойные металлические ленты [4].

В процессе прокатки под действием температуры и давления соединение металлов осуществляется таким образом, что по всей площади поверхностей раздела образуется хорошая связь. Возможные сочетания основного и плакирующего металла чрезвычайно разнообразны. Специфика технологии прокатки и условия ее проведения (температура, давление) зависят от свойств металлов, из которых состоит слоистый композиционный материал (температуры плавления, пластичности, соотношения толщин основного и плакирующего металлов) [5].

На рис. 7 показана схема получения слоистого МКМ по технологии пакетной прокатки. Эта технология позволяет получить композит с малой толщиной слоев (до 5 мкм). В соответствии с представленным технологическим процессом листовые заготовки собирают в пакет, нагревают и подвергают прокатке в горячем состоянии. Степень обжатия в валках должна быть достаточной для сварки листов по контактируемым поверхностям (десятки процентов). Для исключения окисления поверхностей свариваемых листов может быть осуществлена сварка пакета по его периметру.

Полученный при прокатке многослойный лист разрезается на несколько заготовок, которые снова собираются в пакет. Пакет обваривается, нагревается и снова подвергается прокатке. В результате многократного повторения процесса получается слоистый КМ с малой толщиной листов.

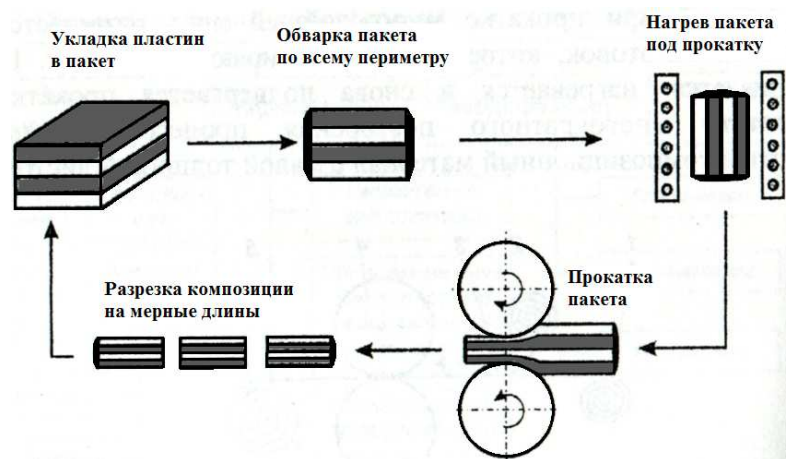


Рис. 7. Схема получения слоистых МКМ методом пакетной прокатки

В качестве упрочняющих элементов МКМ, получаемых методом прокатки, могут использоваться металлические сетки, ленты, непрерывные и дискретные волокна [4].

Недостатки технологии: При соединении двух разнородных металлов возникают внутренние напряжения вследствие разницы в коэффициентах линейного расширения, которые могут привести к нежелательной деформации композиционного материала.

Высокая стоимость соединения прокаткой больших стальных плит для изготовления материала брони с различной твердостью слоев являлась основным препятствием к более широкому использованию этого слоистого материала. Современные методы изготовления материала брони путем электрошлакового переплава обеспечивают потенциальные возможности снижения стоимости на 50% за счет устранения таких дорогостоящих производственных процессов, как сварка кромок пластин, вакуумирование пакета и прокатка, которые проводятся при обычном соединении прокаткой [5].

### **Получение МКМ методами прессования**

Прессование является основной операцией процесса изготовления КМ по методу диффузионной сварки. При выполнении этой операции происходит соединение отдельных элементов заготовок в компактный материал, т.е. формирование изделий. В большинстве случаев прессование заготовок

композитов проводится в замкнутом объеме - в пресс-формах, состоящих из матрицы и двух пуансонов. Прессование КМ по сути является технологическим процессом, близким к операции прессования заготовок в технологии порошковой металлургии.

В процессе прессования происходит пластическая деформация материала матрицы, необходимая для заполнения пространства между волокнами упрочняющей фазы и для максимального уплотнения самой матрицы. При этом наряду с пластической деформацией на границе раздела между слоями либо частицами матрицы (на границах раздела матрица-матрица и матрица-волокно) протекают диффузионные процессы, обеспечивающие прочную связь на этих границах и необходимый уровень прочности КМ.

Основными технологическими параметрами прессования КМ являются давление прессования, температура, время выдержки и среда, в которой осуществляется сам процесс.

Различают четыре разновидности технологии прессования композитов:

- прессования в замкнутых пресс-формах и между обогреваемыми плитами;
- ступенчатое прессование;
- изостатическое, или автоклавное, прессование;
- динамическое горячее прессование.

### **Получение МКМ методом диффузионной сварки**

Одним из важнейших методов формообразования МКМ в твердофазном состоянии является диффузионная сварка. Процесс получения МКМ методом диффузионной сварки по технологическим параметрам незначительно отличается от процесса сварки однородных материалов. Суть процесса заключается в выдержке прижатых друг к другу нагретых до определенной температуры тел. Температура нагрева и внешнее давление должны обеспечить эффективное развитие диффузионных процессов (массоперенос из одного соединяемого тела в другое).



Процесс сварки осуществляется без расплавления металла матрицы. В месте сварки под действием высоких давлений и температуры происходит диффузионный перенос одного металла в другой. Процесс сварки осуществляют преимущественно в вакууме. Возможна сварка в инертной среде, а иногда и на воздухе. Необходимым условием для получения МКМ методом диффузионной сварки является использование пластичной матрицы. Выполнение этого требования обеспечивает возможность пластического течения пластичной матрицы и заполнения пространства между элементами упрочняющего волокна.

В качестве металлической матрицы обычно используется металлическая фольга из пластичного металлического материала. Матричный материал может быть предварительно тем или иным способом (например, плазменным, химическим электрохимическим осаждением) нанесен на арматуру. Упрочнителем в МКМ служат металлические волокна, проволоки, нитевидные кристаллы. Возможно использование упрочнителя в виде сеток, тканей жгутов.

Диффузионные процессы, обеспечивающие качество сварки, развиваются на границах раздела типа матрица-волокно и матрица- матрица. Необходимо обеспечить наиболее благоприятные условия для развития диффузии. К основным методам подготовки поверхности матрицы относятся промывка, обезжиривание, механическая очистка, химическая обработка. Промывка осуществляется в спирте, горячей или холодной воде, в растворах с различными моющими средствами. Для обезжиривания поверхностей используют бензин, ацетон, специальные растворители. При необходимости осуществляется механическая очистка поверхности матричной фольги [4].

### **Получение МКМ методом сварки взрывом**

Все перечисленные способы практически не применимы для производства МКМ сталь-цветной металл или сталь - сплав цветного металла. Для получения таких МКМ широко применяется сварка взрывом.

Этот способ, в создание которого внесли большой вклад учёные Института гидродинамики СО АН СССР, Волгоградского политехнического института, Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР, Алтайского научно-исследовательского института технологии и машиностроения и Центрального научно-исследовательского института черной металлургии, позволяет изготавливать металлические композиционные материалы практически любых сочетаний металлов и сплавов с необходимыми прочностными и пластическими свойствами.

За последние годы российскими специалистами опубликовано довольно много работ по изготовлению композиционных материалов методом сварки взрывом [9-15].

Также этот метод подробно изложен в патентах [16-23]. В табл. 1 представлены сведения о некоторых разработанных патентах. Патенты относятся к разработке способов и режимов получения биметаллических композитов методом сварки взрывом.

Сварку взрывом наиболее целесообразно применять для соединения таких металлов и сплавов, которые известными способами получить невозможно или затруднительно. В ряде случаев сварка взрывом эффективна также при изготовлении крупногабаритных заготовок и листов нержавеющей сталь – углеродистая сталь толщиной свыше 60 мм.

Сварка взрывом – технологический процесс соединения однородных и разнородных материалов. Отличной особенностью этого процесса является его кратковременность.

В основном процесс сварки взрывом включает формирование высокоскоростной ударной волны, удаляющей поверхностный слой каждого из соединяемых металлов. Получаемые чистые поверхности под действием давления взрыва образуют прочное металлургическое соединение. Таким образом, этот процесс удовлетворяет основным условиям соединения любых двух металлов: 1) поверхности должны быть чистыми; 2) очищенные поверхности должны быть плотно соединены.

## Сведения о разработанных патентах

Номер патента, МПК Дата публикации	Авторы	Название, краткое содержание
1	2	3
RU 2005104040/02 B23K 20/08 20.07.2006	Богунов А.З. Кузовников А.А. Малышев В.В. Трескин О.А.	<i>Неразъемное биметаллическое соединение и способ его изготовления</i> Неразъемное биметаллическое соединение, состоящее из двух различающихся по твердости металлов, механически контактирующих между собой через поверхность, состоящую из чередующихся выступов. Механический контакт по вершинам выступов выполнен сваркой взрывом. Способ изготовления включает выполнение на поверхности более твердого металла чередующихся пазов, размещение над этой поверхностью поверхности металла с меньшей твердостью, воздействие на противоположащую поверхность данного металла давлением. Давление создают в результате подрыва взрывчатого вещества, при этом поверхности металлов соударяются и образуют соединение сваркой взрывом с полным заполнением мягким металлом пазов в твердом металле.
RU 2270741 C1 B23K 20/08 27.02.2006	Дренов О.Б. Бурцева О.А. Герасименко В.Ф	<i>Способ сварки взрывом</i> Предложен способ сварки взрывом, включающий установку заряда взрывчатого вещества на верхней поверхности метаемого листа под действием взрыва с неподвижным листом. Вдоль боковой поверхности неподвижного листа на линии, совпадающей с направлением волны детонации, рядами на заданном расстоянии устанавливаются стержневые датчики. Стержневые датчики выполняют высотой, увеличивающейся в направлении, перпендикулярном направлению волны детонации. Датчики необходимы для определения угла соударения свариваемых листов, скорости полета метаемого листа.
RU 2243871 C1 B23K 20/08 10.01.2005	Ашаев В.К. Доронин Г.С. Ермолович Е.И. Яшин В.Б.	<i>Способ сварки взрывом</i> Метаемую пластину устанавливают с зазором над неподвижной пластиной и инициируют заряд, расположенный над метаемой пластиной. Предварительно производят обработку поверхностей свариваемых пластин до шероховатости $R_z = 8,0-12,0$ мкм. Сварку осуществляют давлением продуктов детонации, время действия которых превышает время остывания расплавленных на глубину более 2 мкм поверхностных слоев пластин.

Соединения металлов с помощью данного метода не ограничено различиями в точках плавления или пластичностью соединяемых металлов. Возможны различные варианты сварки взрывом.

Два разнородных металла могут быть легко соединены методом взрыва с использованием техники параллельной укладки пластин (рис. 8). Детонацию вызывают на одном конце подвижной плиты (листа). Резиновый или пластиковый буферный слой служит для защиты подвижной пластины от взрыва. Взрыв заставляет подвижную пластину ударяться о неподвижную с динамическим давлением, гораздо более высоким, чем пределы текучести соединяемых металлов. Если скорость сближения листов в точке столкновения меньше скорости распространения звука в этих двух металлах, на нижней поверхности подвижной плиты образуется ударная волна, которая очищает поверхности раздела. Затем под действием давления взрыва происходит их соединение.

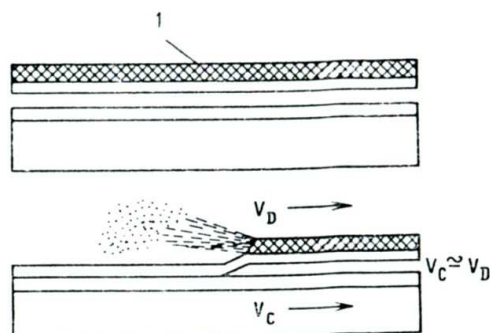


Рис. 8. Схема установки для сварки взрывом при параллельном наложении листов:  $v_D$  – скорость детонации;  $v_C$  – скорость в точке столкновения; 1 – взрывчатое вещество

Поскольку скорость детонации большинства взрывчатых веществ 7000-8000 м/с заметно больше скорости звука в соединяемых материалах (6000 м/с), техникой параллельной укладки свариваемых листов трудно обеспечить необходимую дозвуковую скорость столкновения. Угловое расположение точки столкновения (рис. 9) позволяет обойти эту трудность, так как скорость столкновения является функцией скорости перемещения листов и исходного угла между нижним и верхним листом, на котором располагается взрывчатка, и лишь косвенно зависит от скорости детонации взрывчатого вещества [5].

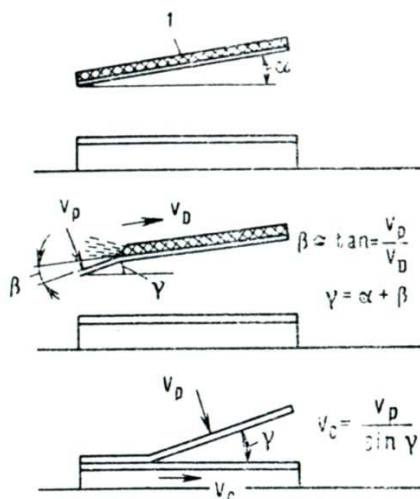


Рис. 9. Схема установки для сварки взрывом при угловом расположении заряда и плиты: 1 - взрывчатое вещество а - исходный угол между верхней и нижней плитой

На рис. 10 представлена схема получения многослойной композиции. В качестве заготовок в данном случае используются объекты в виде пластин. Сварку взрывом особенно применяют для плакирования трубопроводов, соединения труб с листами, плакирования поверхностей износа деталей двигателей и оборудования для ядерных реакторов и химических процессов. Для изготовления сваркой взрывом трубчатых слоистых МКМ могут быть использованы схемы соединения, приведенные на рис. 11. На первой схеме показано расположение взрывчатого вещества внутри трубчатых заготовок. На второй схеме изображен вариант, предусматривающий размещение взрывчатого вещества снаружи заготовок. Важным достоинством сварки взрывом является то, что она позволяет эффективно соединять разнородные материалы. Даже те, которые сваркой плавлением не соединяются.

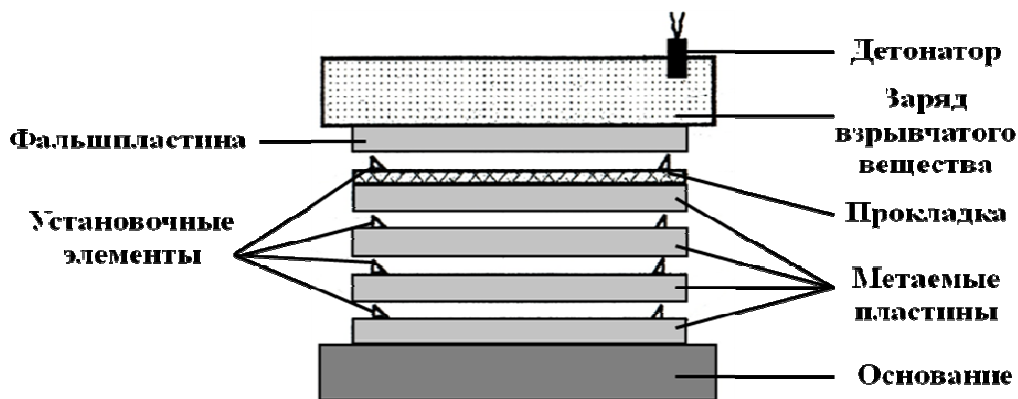


Рис. 10. Схема сварки взрывом многослойных заготовок



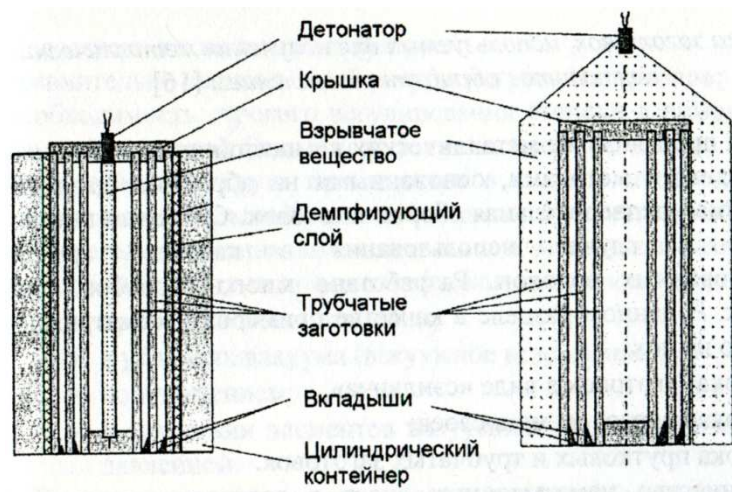


Рис. 11. Схема сварки взрывом многослойных трубчатых заготовок

На рис. 12 показана схема получения МКМ с упрочняющими элементами в виде волокон. Ориентированные определенным образом волокна укладываются на матричный материал, представляющий собой лист или фольгу. При взрыве взрывчатого вещества метаемая плита плотно сжимает слои матричного материала между собой, в результате чего образуется прочное соединение [4].

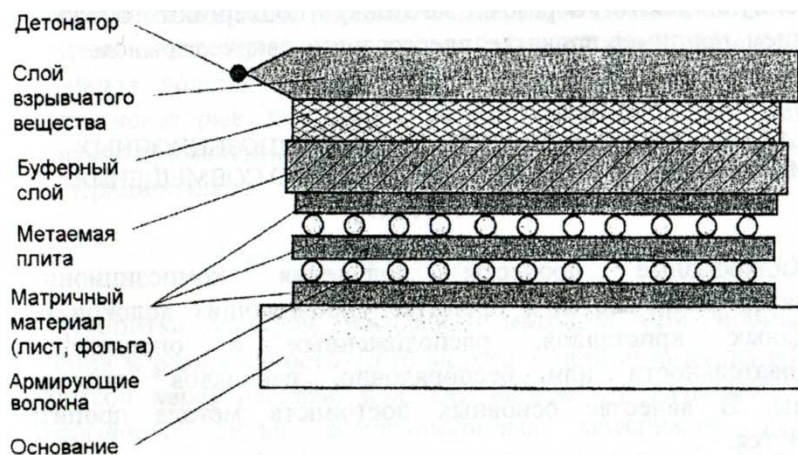


Рис. 12. Получение МКМ методом сварки взрывом

Хорошие сварные соединения, высокая скорость и универсальность метода сделали его экономичным и практичным. Способность осуществлять соединение разнородных металлов, что не может быть получено с помощью других методов, еще более расширяет возможности метода сварки взрывом.

Данный вид сварки не может быть отнесён ни к одному из уже известных видов сварки ввиду некоторых особенностей процесса.

Во-первых, время процесса соединения металлов мало, порядка  $10^{-6}$  секунды, что исключает глубокую взаимную диффузию металлов в обычном понимании.

Во-вторых, величина давления, возникающего при соударении металлов, значительно превышает прочность металлов, что позволяет рассматривать процесс сварки взрывом как гидродинамическую задачу, когда движение металла происходит по законам движения жидкости.

В-третьих, характерная для соединений, полученных сваркой взрывом, волновая форма сварного шва обеспечивает, как правило, повышенную прочность соединения металлов за счёт разрушения и частичного удаления из шва оксидных плёнок и увеличения площади контакта. Прочность сварного шва превышает прочность слабейшего металла пары, если не учитывать случаи, когда в шве возникают образования с пониженной прочностью.

И, наконец, несмотря на значительные деформации слоёв металла на контактных поверхностях и реализации за счёт этого кинетической энергии метаемой пластины в виде тепла, при сварке взрывом отсутствует значительный разогрев металла в области сварки, из-за кратковременности процесса сварки, что исключает появление зон термического влияния, а так же окисления металлов в зоне сварки. Эта особенность позволяет осуществить соединение металлов трудно свариваемых или не свариваемых обычными способами.

Ученые выделяют сварные соединения двух основных видов, полученных при сварке взрывом: плоские соединения и сварные соединения с волнами.

Эти соединения можно разделить на три группы:

- 1) Сварка взрывом металлов, которые не образуют между собой твёрдых растворов и химических соединений. Это пары – медь + сталь, серебро + сталь, свинец + сталь, молибден + медь, вольфрам + медь.

- 2) Сварка взрывом металлов, которые образуют твёрдые растворы. Частным случаем является сварка одноимённых материалов, например, медь + медь, Ст3 +Ст3 и других.
- 3) Сварка взрывом металлов, которые могут образовывать химические соединения. Например, соединения алюминиевых сплавов и сталей, титановых сплавов и сталей, ниобия и стали, ниобия и циркония.

## **1.2. Состояние на межфазной границе**

Свойства композитов зависят не только от способа получения, схемы армирования, но и от состояния на межфазной границе. Поверхность раздела волокно – матрица в армированном материале - весьма важная область, поскольку по ней происходит передача напряжения от матрицы к волокну. Состояние поверхности раздела, характер сцепления волокна с матрицей и возникающие при этом связи, в конечном счете, определяют прочность всей композиции [24].

### **Виды межфазного взаимодействия**

В соответствии с классификацией А. Меткалфа по видам межфазного взаимодействия все КМ делятся на три класса. К первому относятся КМ, у которых волокна и матрица взаимно нерастворимы и не образуют химических соединений, ко второму - КМ, у которых волокна и матрица образуют друг с другом твердые растворы и не образуют химических соединений, к третьему - КМ, у которых волокна и матрица взаимодействуют с образованием химических соединений [25].

В большинстве случаев соединение металлической матрицы с металлическим волокном может сопровождаться их химическим взаимодействием, в результате чего на поверхности раздела образуются интерметаллидные соединения, которые хотя и обеспечивают достаточное сцепление между волокном и матрицей, однако понижают прочность волокон. Кроме того, интерметаллидные соединения переходной зоны, обладая низкой

пластичностью, разрушаются уже при весьма малых деформациях и не обеспечивают передачи напряжений от (матрицы к волокну, в результате чего понижается прочность армированного материала. Наконец присутствие интерметаллидов на поверхностях раздела волокно-матрица чрезвычайно ограничивает, а иногда и вообще исключает возможность дополнительной обработки с целью профилирования композиционных изделий.

Для предотвращения потери прочности армированным материалом в этом случае необходимо при разработке технологии предусмотреть создание диффузионных барьеров или подобрать такие методы и режимы изготовления, которые существенно снизили бы скорости диффузии и реакций взаимодействия между компонентами.

При получении армированных материалов из компонентов, взаимно не растворимых друг в друге или не взаимодействующих друг с другом, трудно обеспечить надежное сцепление волокна и матрицы. Это положение относится в первую очередь к армированию металлов волокнистыми монокристаллами или волокнами из окислов, карбидов и др. Для улучшения их сцепления с матрицей обычно используют легирующие присадки к матрице или на волокна наносят покрытие, что вызывает, в конечном счете, реакции взаимодействия на поверхности раздела, которые, улучшая схватывание, понижают прочность материала из-за ухудшения свойств волокон [24].

Вообще, такая классификация условна, поскольку КМ, содержащие волокна и матрицу на основе одних и тех же компонентов, могут относиться к различным классам в зависимости от концентрации легирующих элементов, условий получения и эксплуатации. Например, КМ с матрицей из чистой меди, армированной вольфрамовыми волокнами, относится к первому классу; если медь легирована небольшим количеством титана, этот же КМ следует отнести ко второму классу, так как в данной системе уже появляется взаимная растворимость; при повышенных концентрациях титана на поверхности раздела появляются интерметаллические соединения и КМ следует отнести к третьему классу.

Существуют, например, КМ псевдопервого класса. Это - системы, состоящие из кинетически совместимых компонентов, в которых принципиально возможно образование новых химических соединений на поверхности раздела. Однако оптимальная технология позволяет избежать их появления в ходе технологического цикла, а эксплуатация осуществляется при достаточно низких температурах, исключающих возможность прохождения химической реакции. Например, КМ Al - В, полученный пропиткой борных волокон расплавленным алюминием, относится к третьему классу, так как при изготовлении композиции на границе раздела волокно - матрица образуется слой борида алюминия. Однако этот же КМ, полученный по оптимальной технологии диффузионной сварки, следует отнести к КМ псевдопервого класса (табл. 2), поскольку реакция образования борида не успевает пройти.

Таблица 2

#### Классификация КМ по видам межфазного взаимодействия

Первый класс	Второй класс	Третий класс
Алюминий – нержавеющая сталь *; Ag-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Al-B *; Al-B/BN; Al-SiC *; Cu- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Cu-W; Mg-B	Направленные эвтектики; Nb-W; Ni-C; Ni-W (выше 1233 K)	Al-C (выше 973 K); Al-SiO <sub>2</sub> ; Ti- Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; Ti-B; Ti-SiC

Примечание. Звездочкой обозначена система псевдопервого класса; В/BN означает бор, покрытый нитридом бора.

#### Типы связей между компонентами

В КМ связи между матрицей и волокнами могут быть шести типов. Механическая связь (рис. 13, а) осуществляется за счет чисто механического зацепления неровностей контактирующих поверхностей матрицы *m* и волокна *f* или за счет сил трения. КМ с этим типом связи имеют низкую прочность при поперечном растяжении и продольном сжатии.

Связь при смачивании и растворении (рис. 13, б) реализуется благодаря силам поверхностного натяжения. Обычно смачивание сопровождается небольшим растворением компонентов. Этот тип связи реализуется при

пропитке волокон  $f$  расплавленной матрицей  $m$  в отсутствие химических реакций. Как и предыдущий, он характерен для КМ первого класса.

Реакционная связь (рис. 13, в) возникает при протекании химической реакции на границе раздела  $m$  и  $f$  с образованием новых химических соединений  $mf_x$ . Этот тип связи присущ КМ третьего класса.

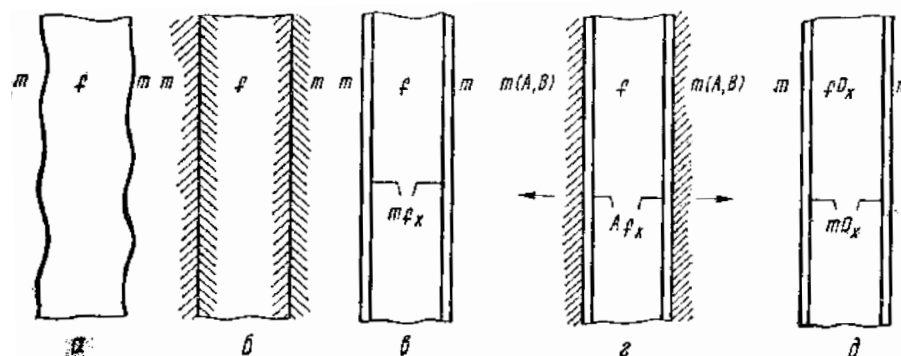


Рис. 13. Схемы основных типов связи:

$a$  – механическая связь;  $b$  – связь путем смачивания и растворения, например Nb-W;  
 $v$  – реакционная связь, например, Ti-C;  $z$  – обменно-реакционная связь, например Ti(Al)-B;  
 $d$  – оксидная связь

Обменно-реакционная связь (рис. 13, г) является разновидностью реакционной связи, когда общая химическая реакция происходит в несколько стадий, одна из которых контролирует скорость образования связи. Например, матрица  $m$  из титана  $A$ , легированного алюминием  $B$ , взаимодействует с борными волокнами  $f$  в две стадии. Вначале твердый раствор алюминия в титане реагирует с бором с образованием сложного диборида  $Af_x$ , который затем реагирует с титаном, образуя диборид титана и твердый раствор алюминия в титане.

Оксидная связь (рис. 13, д) также может рассматриваться как разновидность реакционной связи, которая характерна для металлов  $m$ , армированных волокнами из оксидов  $fO_x$ . Эта связь реализуется за счет образования либо шпинелей на межфазных границах, либо продуктов реакции в виде оксидной пленки  $mO_x$ , через которую осуществляется связь.

Смешанный тип связи возникает в КМ псевдопервого класса после разрушения оксидных пленок и начала химического или диффузионного взаимодействия. Он реализуется, например, при частичном переходе систем псевдопервого класса в системы второго и третьего классов [25].

### **1.3. Свойства слоистых металлических композитов**

Использование металлических пластин в любых инженерных конструкциях перспективно только в тех случаях, когда они улучшают какие-либо свойства или сочетания свойств, а также имеют более низкую стоимость по сравнению со стоимостью монолитного материала. При выборе металлических пластин для использования в слоистых материалах рассматриваются следующие свойства: упругость, прочность, пластичность, вязкость разрушения, физические или химические свойства, такие, как плотность, тепло- и электропроводность, химическая активность или коррозионная стойкость.

Эффективный модуль упругости или удельная жесткость (отношение модуля упругости к плотности) металлического слоистого материала зависит не только от модуля упругости, плотности и объемной доли отдельных металлов, образующих слоистый материал, но также и от их расположения и вида нагружения материала в конструкции.

Использование небольшого количества высокомодульного материала для внешних поверхностей и низкомодульной сердцевины позволяет получить слоистый материал со сравнительно высокой жесткостью при действии изгибающих нагрузок.

На рис. 14 показано увеличение удельной жесткости при изгибе (отношение эффективного модуля изгиба к плотности), которое может быть достигнуто за счет плакирования алюминиевого сплава тонкими слоями коррозионно-стойкой стали, несмотря на значительно более высокую плотность стали по сравнению с алюминием.

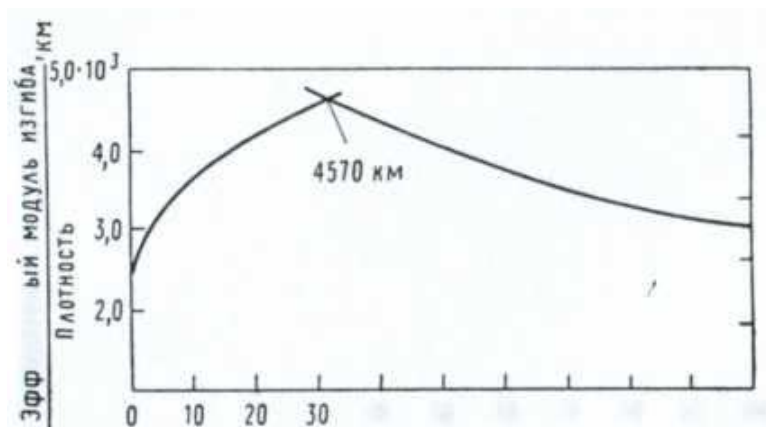


Рис. 14. Эффективная удельная жесткость при изгибе образцов из алюминиевого сплава, плакированных коррозионно-стойкой сталью

При одноосном растяжении текучесть в одном из компонентов слоистого материала возникает в тех случаях, когда напряжение в этом компоненте превышает его предел текучести. Таким образом, текучесть слоистого материала имеет место тогда, когда напряжение в этом материале превышает предел текучести любого компонента слоистого материала.

Экспериментальными исследованиями показано, что слоистые металлические композиционные материалы, у которых прочность связи или прочность промежуточных слоев меньше, чем у основных компонентов, обладают более высоким сопротивлением распространению трещин по сравнению с монолитным материалом или с композиционным материалом с очень высокой прочностью связи.

При распространении трещины перпендикулярно слоям (рис. 15, а) в композиционном материале происходит ее торможение в результате распределения вдоль поверхности раздела слоев вблизи вершины растущей трещины.

У вершины трещины при расслоении происходит релаксация напряжений. Для дальнейшего развития процесса разрушения необходимо повторное зарождение трещины - процесс, требующий значительно большей энергии, чем работа распространения уже имеющейся трещины. В большинстве случаев повторного зарождения трещины не происходит, поскольку последующая деформация слоев осуществляется скорее посредством пластического течения, чем разрушения.



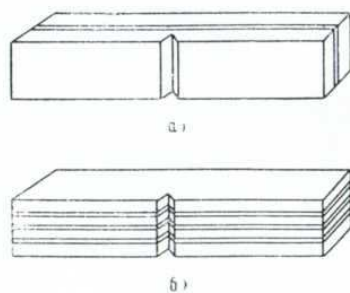


Рис. 15. Схематическая диаграмма слоистого материала:  
*а* - с конфигурацией торможения трещин; *б* - с конфигурацией разветвления трещин

При распространении трещины вдоль слоев (рис. 15, *б*) происходит ее разветвление. Сопротивление материала распространению трещины обеспечивается расщеплением слоя на ряд тонких слоев у ее вершины. Расщепление слоя сопровождается релаксацией внутренних объемных напряжений.

## **2. Изучение структуры и свойств металлических композиционных материалов после различных методов твердофазного совмещения с помощью МРСА, рентгеноструктурного фазового анализа, электронно-микроскопического метода, дилатометрии, ДСК, с привлечением магнитных и физических свойств**

### **2.1. Материал и методы исследования**

Проведенный литературных обзор показал ряд преимуществ металлических композиционных материалов перед обычными конструкционными материалами.

Идея соединения слоев одинаковых или различных металлов для получения композиционных материалов, обладающих более высокими свойствами по сравнению с составляющими их компонентами, является не новой, но полезной и важной идеей. Соответствующим подбором компонентов слоистого материала можно добиться требуемых свойств, удовлетворяющих большому числу разнообразных областей применения. Кроме того, это сочетание свойств в большинстве случаев может быть достигнуто со

значительной экономией дорогостоящих и редких металлов, что является важным фактором в связи с возрастающим потреблением ограниченных минеральных ресурсов.

Использование слоистых материалов из одинаковых металлов также важно вследствие того, что они обладают улучшенными характеристиками вязкости и сопротивлению разрушению.

Наличие ряда хорошо отработанных методов производства слоистых материалов с получением доброкачественных и плотных соединений, таких, как соединение прокаткой, прессование биметаллического профиля, сварка взрывом, пайка, служат основой для выбора оптимального процесса производства данной системы слоистых материалов.

В данной работе были получены слоистые металлические композиционные материалы методом сварки взрывом. Был выбран режим сварки, включающий выбор взрывчатого вещества и толщину его слоя, конфигурацию устройства, параметры детонации и соударения. Подобраны материалы для сварки, из которых был сформирован пятислойный композиционный материал и изучены процессы, протекающие в исследуемых композиционных материалах.

Материалами для сварки служили чередующиеся листы из мартенситностареющей стали 03X12H8K5M2ЮТ (ЗИ-90), дюралюминия Д16, бронзы БрБНТ1.7 и титанового сплава ОТ4-1.

Химический состав использованных сплавов приведен в табл. 3, а механические свойства в табл. 4.

Материалы были получены по следующей технологии:

Рулоны подката со станов горячей прокатки поступают в листопрокатный цех и после непрерывного травильного агрегата, прокатываются на непрерывном пятиклетьевом стане с обжатием 70-75%. Продольный роспуск исходных полос на ленту заданных размеров осуществляется на многодисковых ножницах оправкового типа.

Таблица 3

Химический состав исследуемых материалов

Марка	C	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	Ti	Al	Cu	Si	Mn	Be	Mg	Pb	Zr	S	P
03X12H8K5M2TЮ (ЗИ-90)	≤0,03	-	8,6	5,3	12,3	2,8	0,8	0,25	-	-	≤0,2 (Mn+Si)	-	-	-	-	≤0,02	≤0,02
Д16	-	0,30	-	-	0,10	-	0,15	основа	3,8-4,9	0,20	0,3-0,9	-	1,2- 1,8	-	-	-	-
БрБНТ1,7	-	до 0,15	0,2- 0,4	-	-	-	0,1- 0,25	до 0,15	основа	до 0,15	-	1,65- 1,85	-	до 0,005	-	-	-
ОТ4-1	-	0,30	-	-	-	-	основа	1,5-2,5	-	0,12	0,7-2,0	-	-	-	0,30	-	-

Таблица 4

Механические свойства исследуемых материалов

Марка	σ <sub>B</sub> , МПа	σ <sub>T</sub> , МПа	δ, %
03X12H8K5M2TЮ (ЗИ-90)	1426	955	1,5
Д16	415	310	13
БрБНТ1,7	410	250	1,4
ОТ4-1	590	-	12

Таким образом были получены ленты из мартенситно-стареющей стали размером 250×500×0,3 мм, бериллиевой бронзы БрБНТ1.7 - 1000×500×1,0 мм и ОТ4-1 - 300×500×1,0 мм. В последующем из лент были вырезаны образцы для механических испытаний и дальнейших исследований.

Микроструктура материалов в исходном состоянии представлена на рис. 16. После закалки от температур однофазной  $\gamma$ -области структура исследуемой стали 03X12H8K5M2ЮТ состоит практически из 100 % мартенсита. Тетрагональность мартенсита вследствие малого содержания углерода незначительна. Структура стали имеет вид так называемого «массивного мартенсита» или мартенсита замещения. Микроструктура закаленной стали 03X12H8K5M2ЮТ показана на рис. 16, *а*. При холодной пластической деформации происходит возникновение волокнистой направленной аксиальной текстуры  $\langle 110 \rangle$  (рис. 17).

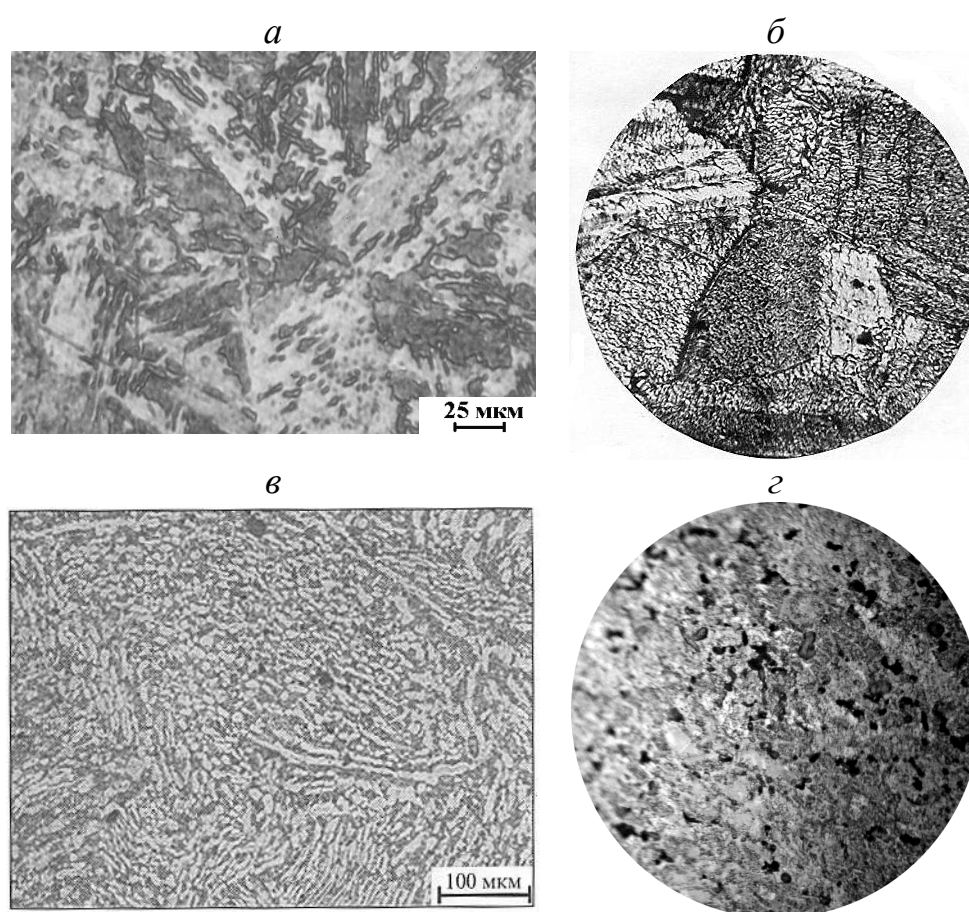


Рис. 16. Микроструктура материалов в исходном состоянии:  
*а* – ЗИ-90 (закалка от 1000°C); *б* - БрБНТ1.7 (закалка);  
*в* - ОТ4-1 (отжиг при 750°C в течение 1 ч); *з* – Д16 (закалка и старение)

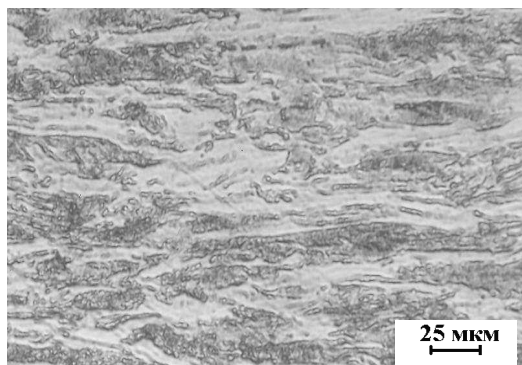


Рис. 17. Микроструктура исследуемой стали 03X12H8K5M2ЮТ после закалки от 950° С + деф. 75 %

Отечественные промышленные бериллиевые бронзы содержат 1,5-2,5% бериллия. Поэтому в закаленном состоянии сплавы имеют однофазную структуру зерен  $\alpha$ -твердого раствора, либо двухфазную ( $\alpha+\beta$ ). Присутствие около 0,5% никеля, сужающего область растворимости бериллия в меди, на фазовом составе практически не сказывается.

$\alpha$ -фаза представляет собой твердый раствор замещения с ГЦК решеткой, величина параметра которой с ростом содержания бериллия уменьшается.  $\beta$ -фазы имеет неупорядоченную объемно-центрированную решетку с периодом 0,279 нм.

В закаленном состоянии сплав БрБНТ1.7 в соответствии с положением на диаграмме медь-бериллий (рис. 18) двухфазен. В случае неоднородного содержания бериллия количество зерен  $\beta$ -фазы непостоянно. Местами могут встретиться участки, где она отсутствует совершенно. Отсюда её влияние на механические характеристики сплавов можем считать несущественным. Микроструктура закаленного сплава состоит из зерен  $\alpha$ -твердого раствора.  $\beta$ -фаза располагается по границам зерен (более светлая составляющая) и внутри зерен  $\alpha$ -твердого раствора (рис. 16, б). В некоторых зернах могут присутствовать двойники закалочного охлаждения.

В закаленном состоянии сплав БрБНТ1.7 в соответствии с положением на диаграмме медь-бериллий (рис. 18) двухфазен. В случае неоднородного содержания бериллия количество зерен  $\beta$ -фазы непостоянно. Местами могут

встретиться участки, где она отсутствует совершенно. Отсюда её влияние на механические характеристики сплавов можем считать несущественным. Микроструктура закаленного сплава состоит из зерен  $\alpha$ -твердого раствора.  $\beta$ -фаза располагается по границам зерен (более светлая составляющая) и внутри зерен  $\alpha$ -твердого раствора (рис. 16, б). В некоторых зернах могут присутствовать двойники закалочного охлаждения.

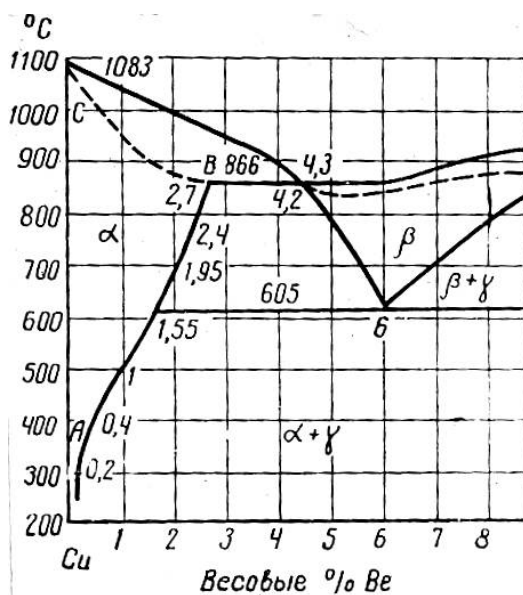


Рис. 18. Диаграмма состояния сплава медь-бериллий (по Хансену)

При травлении азотной кислотой границы зерен весьма ажурны – видна прерывистая оторочка по границам зерен (рис. 16, б).

ОТ4-1 относится к классу псевдо- $\alpha$  по структуре (рис. 16, в). Структура сплава ОТ4-1 системы Ti - Al - Mn при комнатной температуре представлена  $\alpha$ -фазой и небольшим количеством  $\beta$ -фазы вследствие дополнительного легирования марганцем. В данной структуре присутствует  $\alpha$ -фаза (светлая) глобулярного типа в смешанной структуре сплава ОТ4-1.

В структуре сплава Д16 (рис. 16, г) помимо основной матричной фазы  $\alpha$ , имеются частицы интерметаллидной фазы  $\text{CuAl}_2$ . Последние могут располагаться в объеме или по границам зерен  $\alpha$ -фазы. При этом основной

структурной (и фазовой) составляющей этого сплава является  $\alpha$ -твердый раствор, состоящий из меди и алюминия, имеющей ГЦК решетку.

Из пластин были сформированы многослойные композиционные материалы (табл. 5).

Таблица 5

Состав исследуемых многослойных композиционных материалов

I	Д16 – 03Х12Н8К5М2ЮТ – Д16
II	Д16 – 03Х12Н8К5М2ЮТ – Д16 – 03Х12Н8К5М2ЮТ – Д16
III	БрБНТ1.7 – 03Х12Н8К5М2ЮТ – БрБНТ1.7 – 03Х12Н8К5М2ЮТ – БрБНТ1.7
IV	03Х12Н8К5М2ЮТ – Д16 – 03Х12Н8К5М2ЮТ
V	03Х12Н8К5М2ЮТ – Д16 – 03Х12Н8К5М2ЮТ
VI	03Х12Н8К5М2ЮТ – ОТ4-1 – Д16 – ОТ4-1 – 03Х12Н8К5М2ЮТ

Сварку взрывом выполняли в ОАО «Уралхиммаш» в взрывной камере, представленной на рис. 19.

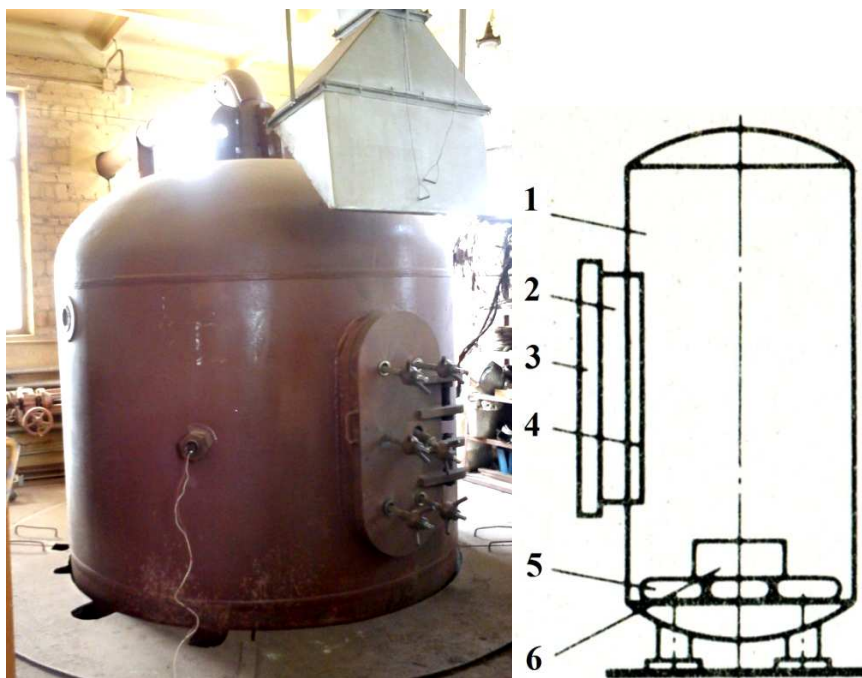


Рис. 19. Внешний вид взрывной камеры

Взрывная камера – цилиндрическая или сферическая оболочка, герметически закрываемая при взрыве и устанавливаемая в специальном

помещении на предприятии или в отдельном месте. При строительстве взрывных камер применяют котельную сталь, хорошо выдерживающую высокие давления и тепловую нагрузку. В ОАО «Уралхиммаш» применяют тонкостенную вертикальную цилиндрическую камеру с двумя эллиптическими днищами, рассчитанную на заряд до 6 кг в.в. Оболочка 1 с толщиной стенок 10 мм и днища 16 мм выполнена из стали 22К. Загрузочный люк 2 размером 2,0 × 0,8 м позволяет размещать в камере изделия значительных размеров – наружной (герметизирующей) 3 и внутренней (противоударной) 4. Опора с наполнителем из металлической дроби 6, служащая для технологических операций, установлена на амортизаторах 5. Надежность, технико-экономическая целесообразность данной установки подтверждены многолетним опытом её эксплуатации [26].

При сварке использовали параллельное расположение пластин (рис. 20) и следующие параметры сварки:  $\gamma = 20-30^\circ$ ;  $V_d = 2450$  м/с, где  $\gamma$  - угол соударения,  $V_d$  – скорость детонации. Высота слоя взрывчатого вещества составляла 20 мм. Зазоры между свариваемыми пластинами - 2 мм.

Сварка взрывом крупногабаритных заготовок (рис. 21) композиционных материалов производится на базе полигона (рис. 22).

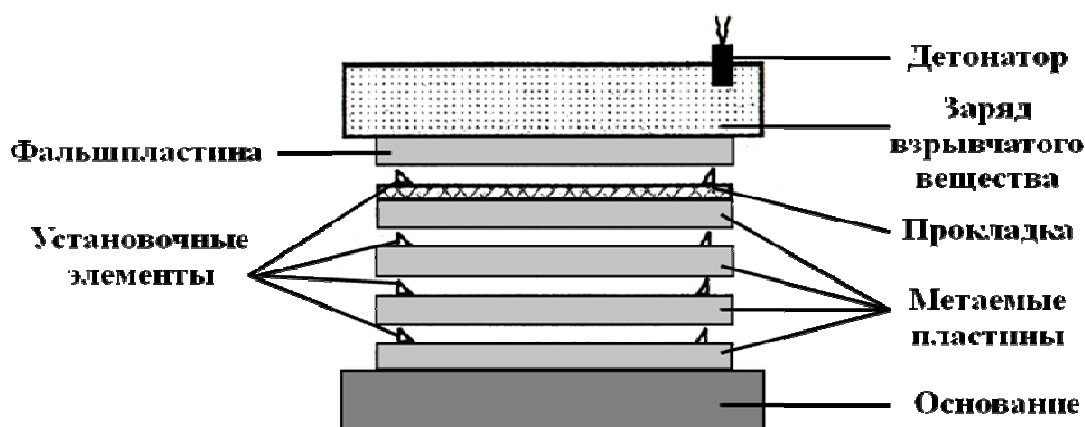


Рис. 20. Схема сварки взрывом

Были проведены следующие исследования композитов: металлография, растровая электронная микроскопия (РЭМ), рентгеноструктурный фазовый анализ, микрорентгеноспектральный анализ (МРСА), фрактографический



анализ и испытания механических свойств, на образцах непосредственно после сварки взрывом, так и после проведения термообработки (рекристаллизационного отжига). Образцы были обработаны в печах типа СНОЛ по следующим технологическим режимам (рис. 23): отжиг от  $T = 200, 300, 400, 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выдержка 1 ч., охлаждение на воздухе.



Рис. 21. Заготовки для сварки взрывом

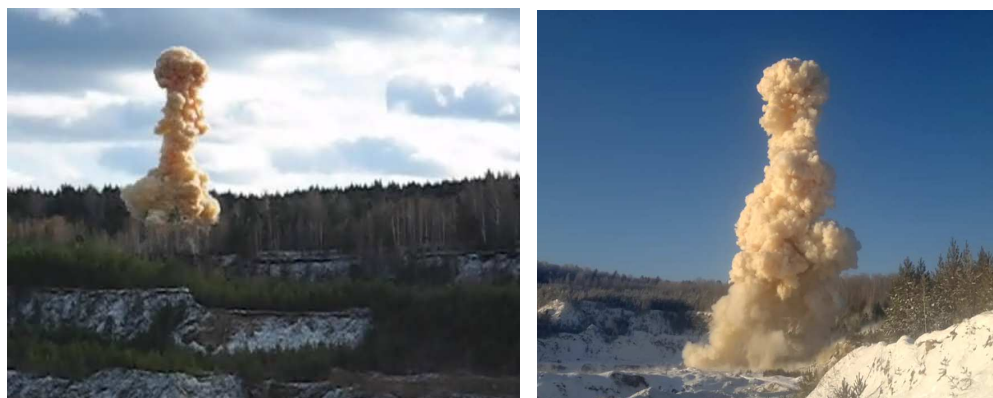


Рис. 22. Сварка взрывом на полигоне

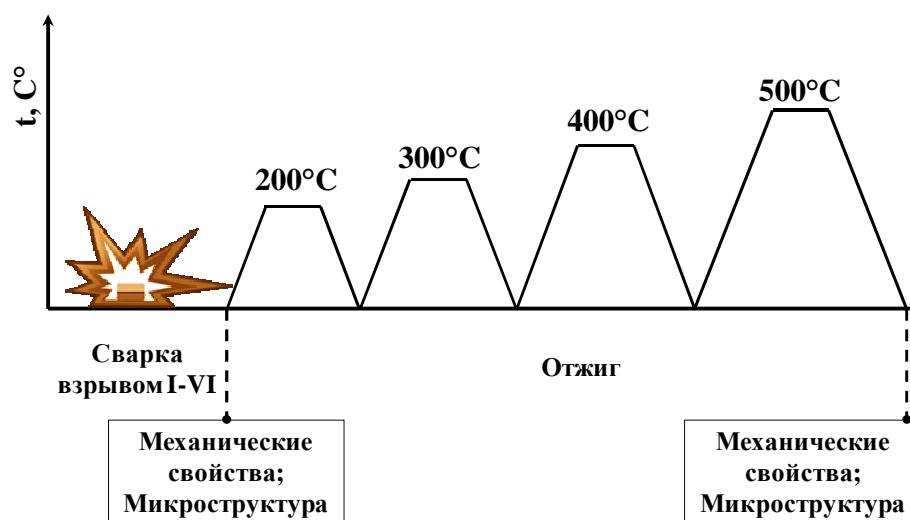


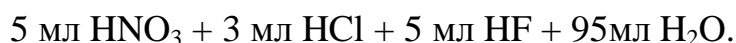
Рис. 23. Режимы обработки композитов

Для изучения процессов, протекающих в исследуемом композиционном материале, были использованы следующие методы: микроструктурного, микрорентгеноспектрального, электронно-микроструктурного анализов, а также исследования механических свойств соединяемых металлов и композита.

Прочностные характеристики композитов изучали с помощью испытаний композиционного материала и исходных материалов на растяжение.

Фрактографию изучали с помощью РЭМ на изломах, полученных после испытания на растяжение и на перегиб.

Металлографический анализ осуществляли с применением оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 при увеличениях 250-500 крат. Для травления шлифов использовали реактив:



В растровом электронном микроскопе (РЭМ) и рентгеновском микроанализаторе (РМА) получают изображение микрообластей поверхности образцов или проводят анализ элементного состава приповерхностных микрообъемов, используя сигналы, возникающие при облучении образцов тонко сфокусированным электронным пучком. Пучок либо зондирует одну точку на образце, либо разворачивается в растр (сканирует) по поверхности образца [27]. Увеличения от 5-кратного до 30 000. Ускоряющее напряжение 30 – 50 кВ [28].

Микрорентгеноспектральный анализ проводился на растровом электронном микроанализаторе Philips SEM 535 с приставкой Jeol JSM-649LV с системой микроанализа Oxford Instruments Inca Energy 350.

Фрактографический анализ поверхности изломов ударных образцов методами растровой электронной микроскопии проводился на микроскопе Philips SEM 535 с разрешающей способностью  $\sim 50 \text{ \AA}$  при ускоряющем напряжении  $E = 25 \text{ кВ}$ . В качестве исследуемых образцов служили образцы, подвергнутые испытаниям на разрыв и перегиб.

Измерение микротвердости проводили в Институте металлургии в лаборатории пирометаллургии черных металлов на микротвердомере Micromet

5103 (рис. 24). Испытательная система для определения микротвердости по методу Виккерса (Buehler, Германия) при нагрузке от 10 до 1000 г.

Прибор совмещает в себе функции микротвердомера и оптического микроскопа - наличие турели с тремя объективами - x10, x50 и x100 дает возможность получать соответствующее увеличение. Прибор оснащен цветной видеокамерой и двумя ЖК-мониторами, позволяющими наблюдать на одном мониторе – «живое» изображение объекта, а на втором - проводить анализ изображений и построение панорам поверхностей размером в десятки или сотни полей зрения с помощью системы анализа изображений Thixomet Pro (СПбГПУ, Санкт-Петербург).

Программа Thixomet Pro в режиме полуавтоматического и автоматического анализа изображений по стандартным методам (ГОСТ, ASTM, ISO и DIN), позволяет проводить оценку качества структуры стали и сплавов, а также различные ручные измерения величины зерна, глубины обезуглероженного слоя, размера и количества неметаллических включений, графита или других фазовых составляющих и др.



Рис. 24. Микротвердомер Micromet 5103

Механические испытания проводились на электромеханической разрывной машине Instron 3380 (рис. 25) в соответствии с ГОСТ 1497-84. При этом на образцах определяли: временное сопротивление при разрыве ( $\sigma_b$ , МПа),

относительное удлинение ( $\delta$ , %); относительное сужение поперечного сечения при разрыве ( $\psi$ , %); предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ , МПа).



Рис. 25. Универсальная напольная машина для испытаний серии 3380

Для оценки прочности сцепления слоистых композиционных материалов целесообразно применять испытания на загиб с перегибом.

Испытанию на перегиб подвергают биметаллические листы толщиной не более 5 мм. Размеры образцов принимают обычно следующими: ширина  $b = 2a + 10$  мм, длина 150 мм.

Образец зажимают в губки прибора в вертикальном положении и затем попеременно загибают в правую и левую стороны на  $90^\circ$  со скоростью не более 60 перегибов в минуту. Испытание проводят до разрушения образца с фиксацией соответствующего числа перегибов. Признаком качественного сцепления слоев считается отсутствие в изломе отслоения плакирующего слоя.

## 2.2. Результаты эксперимента и их обсуждение

*Сварка взрывом* представляет собой высокоинтенсивное кратковременное воздействие, которое позволяет получать соединения как однородных, так и разнородных металлических материалов. Одной из основных задач исследования являлось *определение параметров сварки взрывом* и их оптимизации для различных материалов. Наиболее важной и наименее исследованной является переходная зона вблизи контактной поверхности

сварных соединений. Именно структура переходной зоны во многом определяет прочностные характеристики полученных соединений. Поэтому состоянию переходной зоны было уделено особое внимание. Определение параметров сварки взрывом осуществлялось в ОАО «Уралхиммаш» и в результате проделанной работы были выбраны для вышеперечисленных в главе 2 материалов следующие параметры сварки:  $\gamma = 20-30^\circ$ ;  $V_d = 2450$  м/с, где  $\gamma$  - угол соударения,  $V_d$  – скорость детонации. На полученных слоистых композитах были проведены микроструктурные, дюрометрические, микрорентгеноспектральные, фрактографические исследования, а также механические испытания как непосредственно после сварки взрывом, так и после термических обработок указанных на схеме (рис. 23). Рассмотрим последовательно композиты, изготовленные путем совмещения различных материалов сваркой взрывом.

### ***Композит I: Д16 – 03Х12Н8К5М2ЮТ – Д16***

Трехслойный КМ получен сваркой взрывом пластин Д16 и стали 03Х12Н8К5М2ЮТ толщиной 1 и 0,25 мм соответственно. На рис. 26-27 приведено поперечное сечение полученного композита. После сварки взрывом толщины слоев составляли: сплав Д16 – 0,87 мм, сталь 03Х12Н8К5М2ЮТ – 0,18 мм (рис. 26).

На границе между материалами видны более светлые участки, по-видимому, несколько иного состава. Назовем ее условно зоной перемешивания. Неровностей поверхности практически не наблюдается.

Исследование распределения микротвердости по поперечному сечению трехслойной композиции показало, что зона перемешивания, по-видимому, является зоной несколько обедненной легирующими элементами дюрала, которая имеет меньшее пересыщение легирующими элементами (рис. 28). Микротвердость дюрала составляет порядка  $200\text{ HV}_{10}$ , в то время как микротвердость мартенситностареющей стали составляет  $500\text{ HV}_{10}$ .





Рис. 26. Микроструктура КМ I

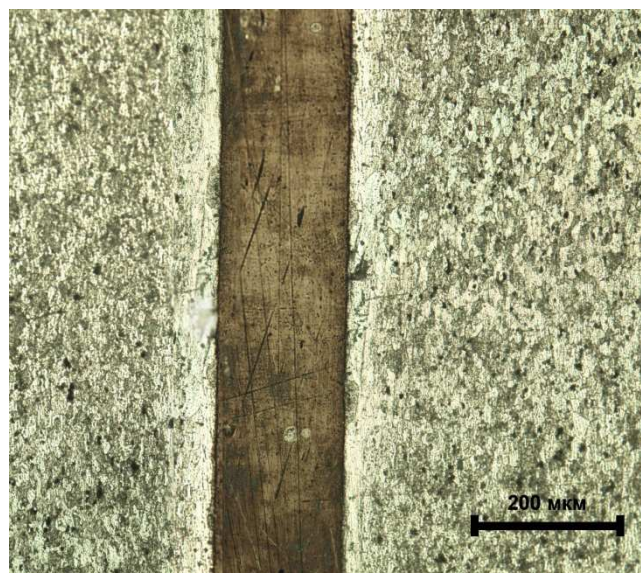


Рис. 27. Микроструктура КМ I

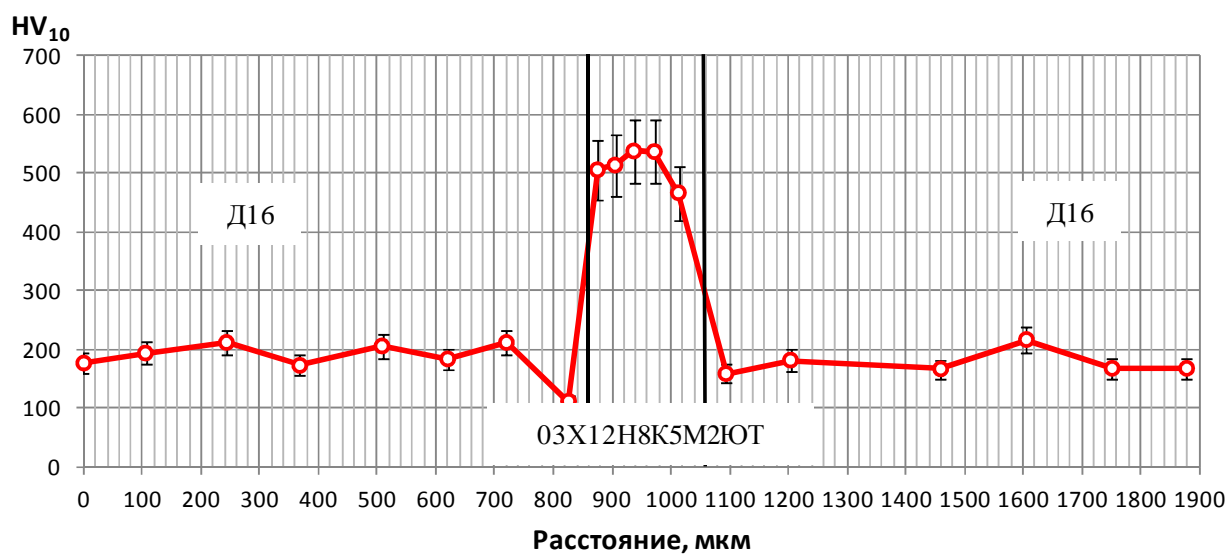


Рис. 28. Распределение микротвердости по сечению композиции I после сварки взрывом

Механические свойства композиции I после сварки взрывом составляют:  $\sigma_B = 560$  МПа,  $\sigma_T = 456$  МПа,  $\delta = 9$  %. Испытания композиционного материала и исходных материалов на растяжение показало, что прочностные характеристики композиционного материала несколько ниже прочностных

характеристик мартенситно-стареющей стали, однако выше материала матрицы, в данном случае, дюрала.

**Композит II: Д16 – 03Х12Н8К5М2ЮТ – Д16 – 03Х12Н8К5М2ЮТ – Д16**

Пятислойный КМ получен сваркой взрывом пластин Д16 и стали 03Х12Н8К5М2ЮТ толщиной 1 и 0,25 мм соответственно. На рис. 29 приведено поперечное сечение сварного соединения. После сварки взрывом толщины слоев составляли: сплав Д16 – 0,86 мм, сталь 03Х12Н8К5М2ЮТ – 0,20 мм.

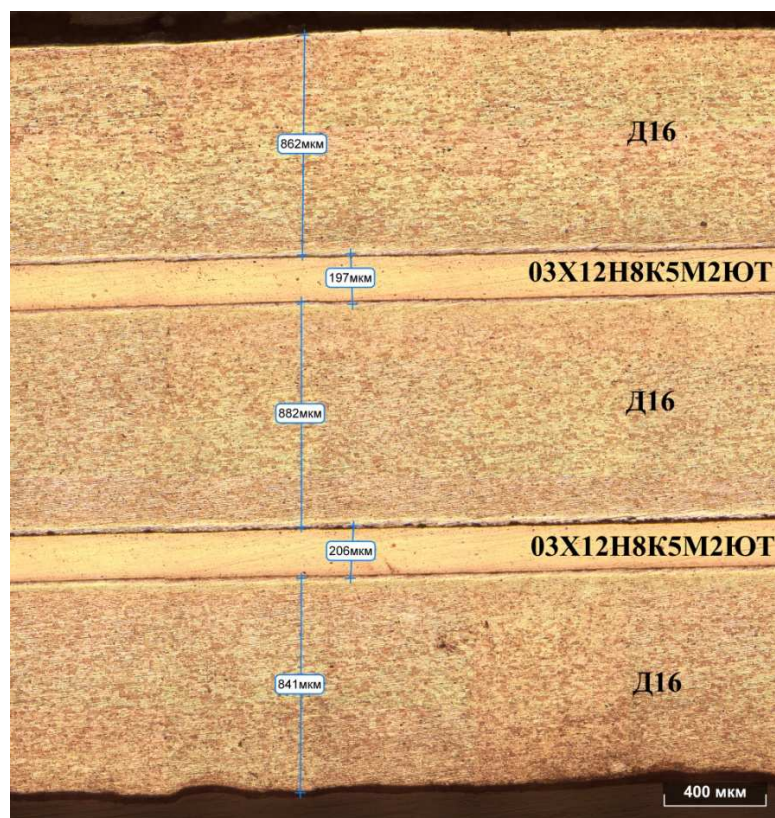


Рис. 29. Микроструктура КМ II

Металлографическим анализом было выявлено наличие трех зон: зоны мартенситно-стареющей стали, со структурой пакетного мартенсита (рис. 30, в), переходной зоны между слоями алюминий-сталь (рис. 30, б) и зоны – дюрала (рис. 30, а).



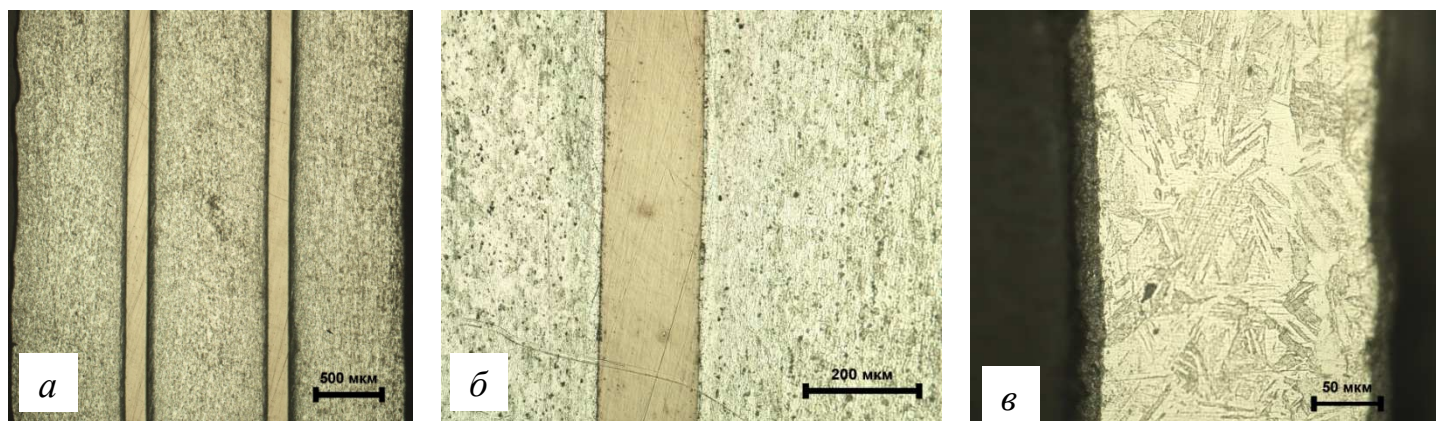


Рис. 30. Микроструктура КМ II после сварки взрывом  
(после травления разными травителями)

Обнаружена микрогетерогенная структура переходной зоны. Переходная зона является неоднородной и имеет толщину порядка 15-20 мкм. Для выяснения структуры переходной зоны были проведены микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) и растровая электронная микроскопия (РЭМ) (рис. 31 и 32). Неровности разделяющих поверхностей незначительные, однако, можно отметить образование очень тонкого переходного слоя, содержащего повышенное содержание алюминия до 85 ат. %, а также атомы железа, хрома и никеля. По внешнему виду выделений можно предположить, что это прослойка интерметаллидной фазы.

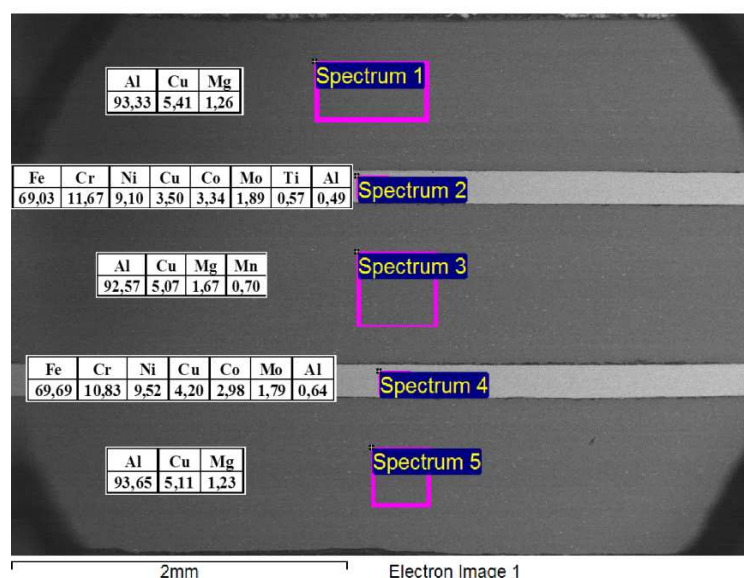


Рис. 31. МРСА КМ II



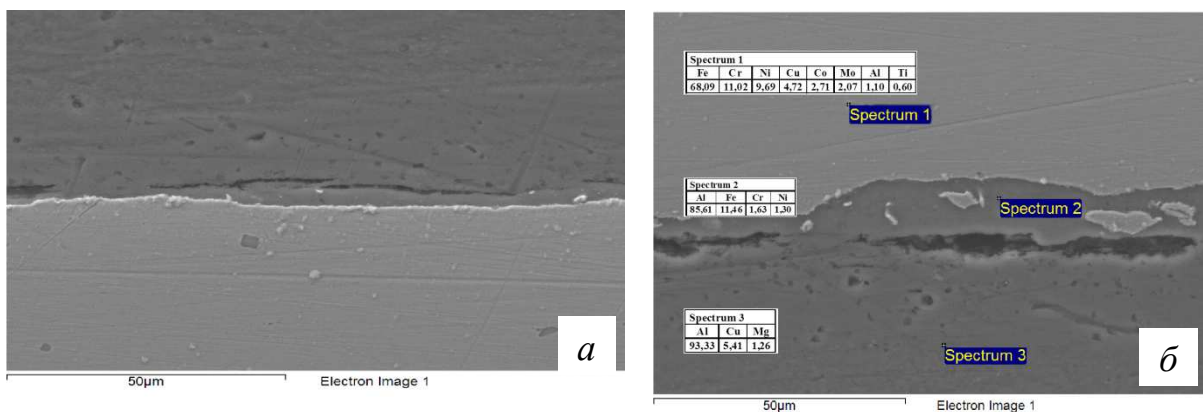


Рис. 32. МРСА зоны соединения композиции П:  
Д16 (верх) + сталь (низ) (а) и сталь (верх) + Д16 (низ) (б)

При замерах микротвердости по поперечному сечению пятислойной композиции не удалось попасть в данную зону, так как она имеет очень узкую область существования (рис. 33). Микротвердость дюрала составляет порядка 200  $HV_{10}$ , в то время как микротвердость мартенситностареющей стали составляет 500  $HV_{10}$ .

Микрофрактографические исследования разрушенных образцов выявили характерный вязкий излом во всех зонах по сечению композита (рис. 34).

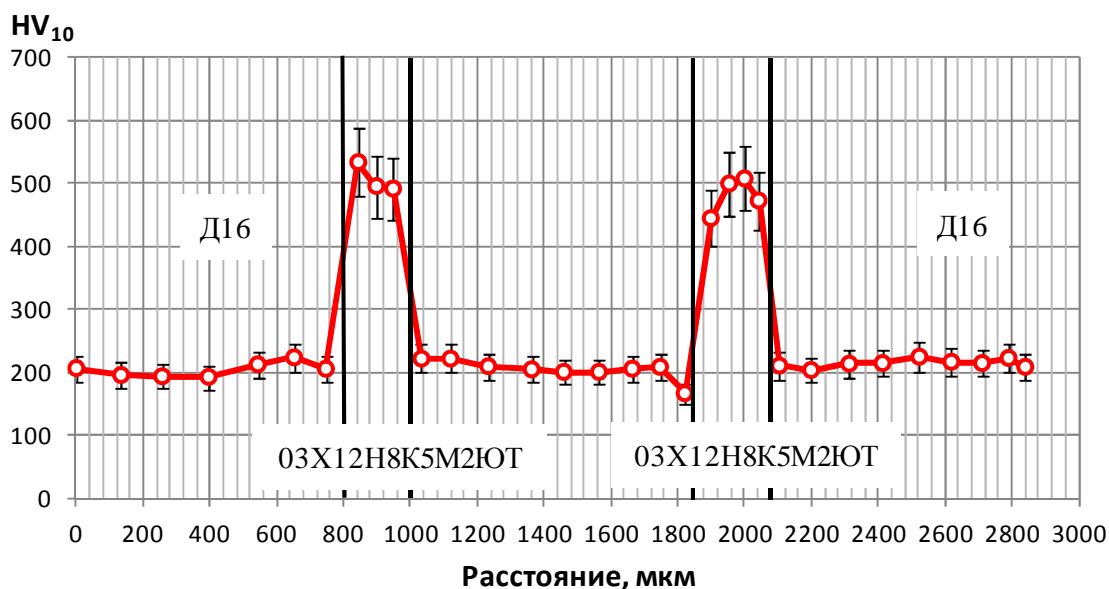


Рис. 33. Распределение микротвердости по сечению композиции П после сварки взрывом

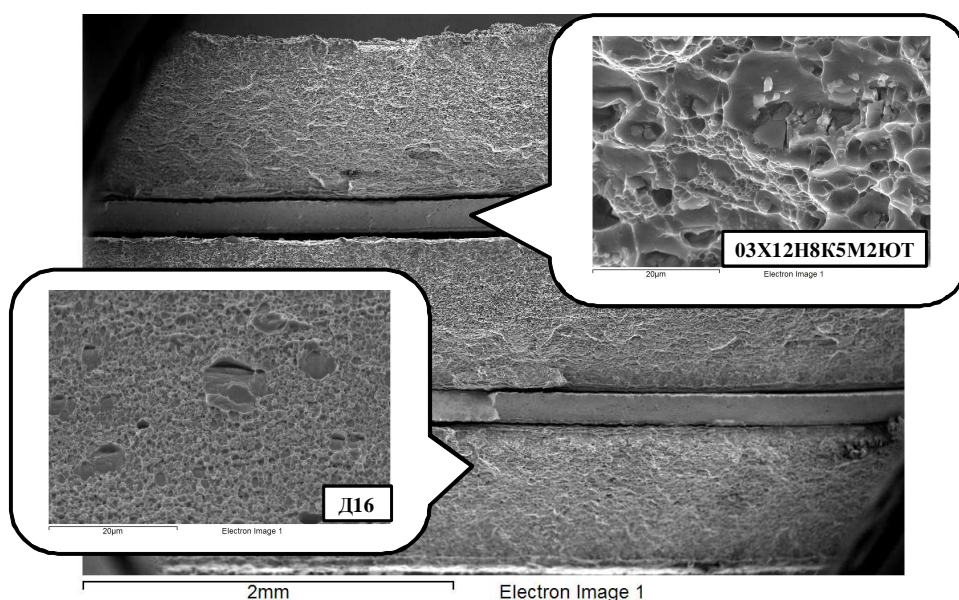


Рис. 34. Фрактография с места разрыва КМ II

Для снятия остаточных напряжений композиты после сварки взрывом необходимо подвергать термической обработке. Для выбора режима термообработки пользуются различными критериями. Некоторые исследователи используют результаты замера микротвердости по сечению сварного соединения. Другие ориентируются на прочностные свойства соединения.

Мы исходили из температур необходимых для протекания процессов рекристаллизации и релаксации напряжений. Поскольку исходные материалы для композитов имели различные температуры плавления, а, следовательно, и рекристаллизации, то нагрев проводили при различных температурах в интервале 200...500°C с выдержкой при указанных температурах в течении 1 ч. Микроструктурные исследования термообработанных композитов приведены на рис. 35. Поскольку подобрать реактив для травления для разных материалов оказалось достаточно трудно, то видимых изменений микроструктуры после термической обработки не наблюдается.

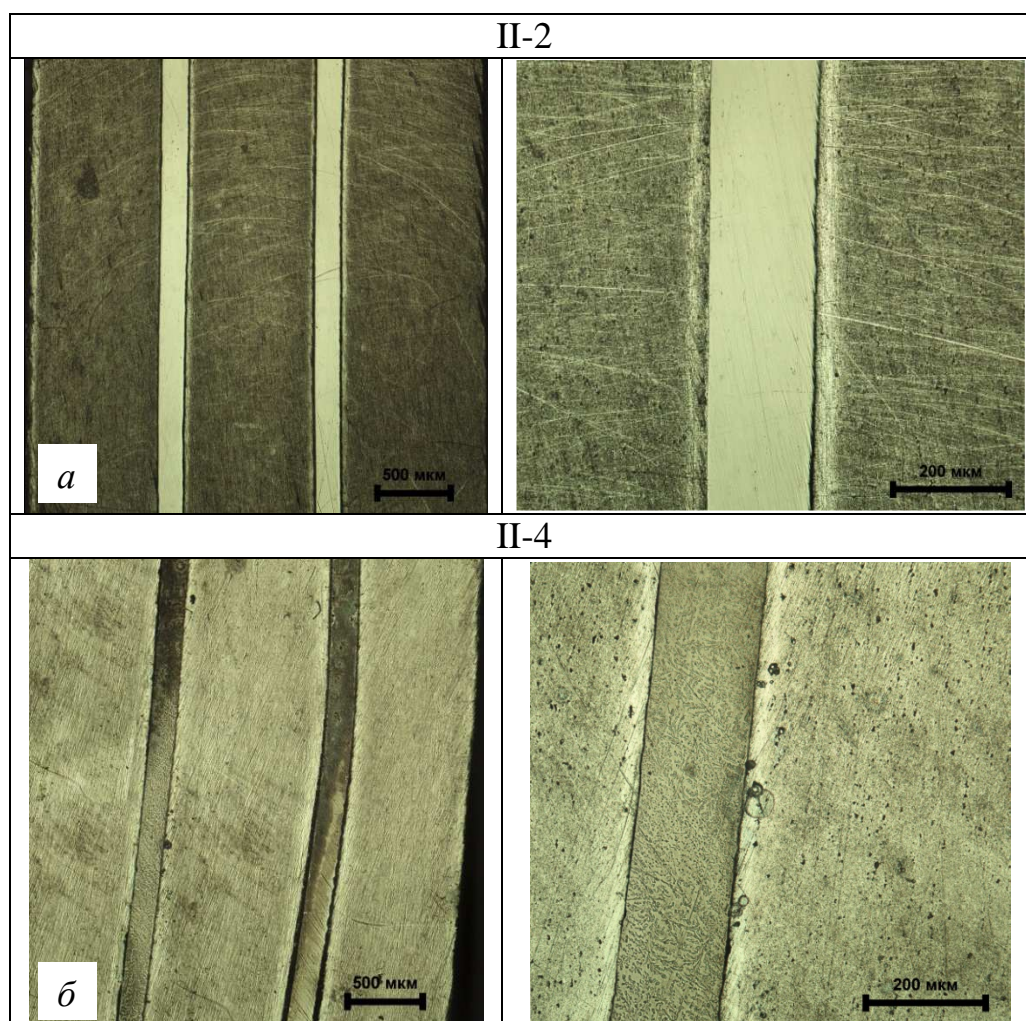


Рис. 35. Микроструктура КМ II после различных термических обработок: отжиг на 300°C (а) и после отжига на 500°C (б)

Однако в связи с протеканием диффузионных процессов и процессов рекристаллизации наблюдается повышение пластических свойств (с 6 до 13 %). Механические свойства композиции II непосредственно после сварки взрывом (образец II-0) и после отжига на 500°C (образец II-4) представлены в табл. 6. Поскольку испытания механических свойств проводилось не на стандартных образцах, то судить об изменении прочностных свойств лучше по измерению микротвердости.

Таблица 6

Механические свойства композита II

Обозначение образца	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
II-0	505	422	6
II-4	432	441	13



### **Композит III: БрБНТ1.7 – 03Х12Н8К5М2ЮТ - БрБНТ1.7 – 03Х12Н8К5М2ЮТ - БрБНТ1.7**

Пятислойный КМ получен сваркой взрывом пластин из бронзы БрБНТ1.7 и стали 03Х12Н8К5М2ЮТ толщиной 0,1 и 0,2 мм соответственно. На рис. 34 приведено поперечное сечение сварного соединения. После сварки взрывом толщины слоев составляли: БрБНТ1.7 – 0,1 мм, сталь 03Х12Н8К5М2ЮТ – 0,15 мм (рис. 36). Переходная зона данного композита отличается от описанных выше, прежде всего, волнообразной границей раздела, амплитудой и длиной волны у разных слоев относительно ударной волны. Это объясняется тем, что верхние сварные швы подвергаются более интенсивному динамическому нагружению. Длина и амплитуда волны составляют примерно: для верхней волны - 94 и 23 мкм; для средней – 71 и 9 мкм; для нижней – 304 и 94 мкм, соответственно.

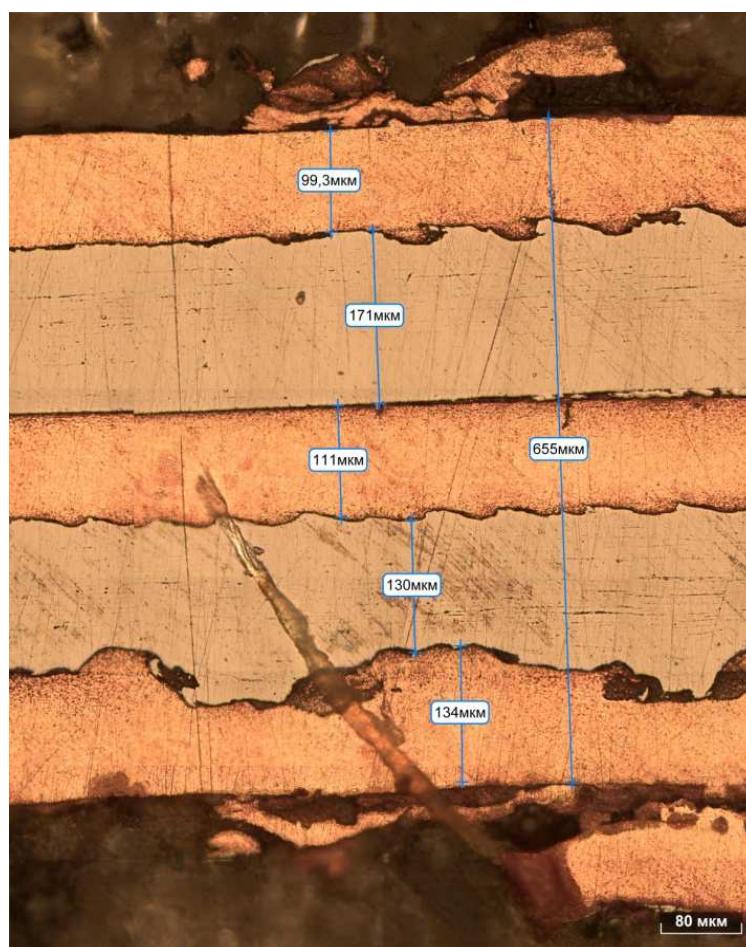


Рис. 36 Микроструктура КМ III после сварки взрывом

Микрорентгеноспектральный анализ позволил выявить следующие спектральные анализы слоев (рис. 37). Неровности поверхностей раздела можно охарактеризовать как выступы одного металла в другой. На границах видны участки серого цвета, состав которых был определен методом микрорентгеноспектрального анализа (рис. 38, в). Полученные результаты свидетельствуют о том, что эти зоны были образованы в результате интенсивного перемешивания стали и бериллиевой бронзы. Структура зоны перемешивания содержит железа – 41,5 %; меди – 40,5%; хрома – 6,5%; бериллия – 6,0 % и никеля – 5,4 %. Это свидетельствует, что в процессе сварки через границу раздела происходит интенсивный массоперенос как посредством деформации волнообразования с образованием множества выступов одного материала в другой на образующейся волнообразной границе, так и, возможно, вследствие расплавления материалов на границе раздела и интенсивной циркуляции расплава в случае образования зон локального расплавления с наблюдаемых в них вихреобразованием.

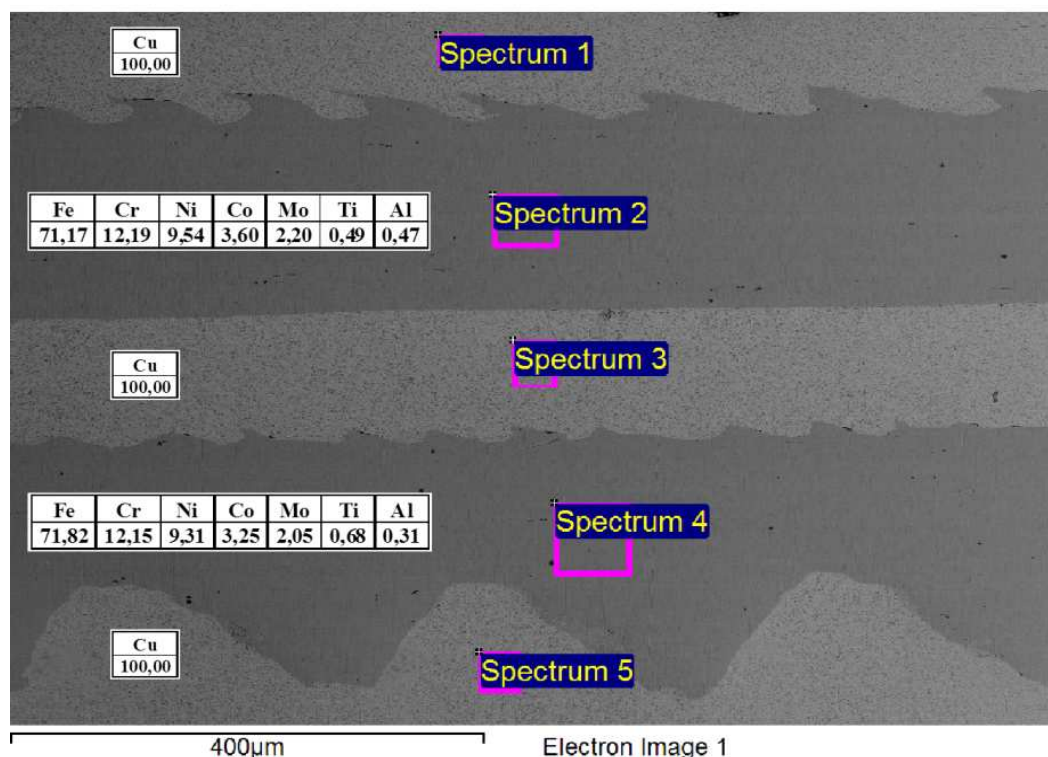


Рис. 37. МРСА КМ III

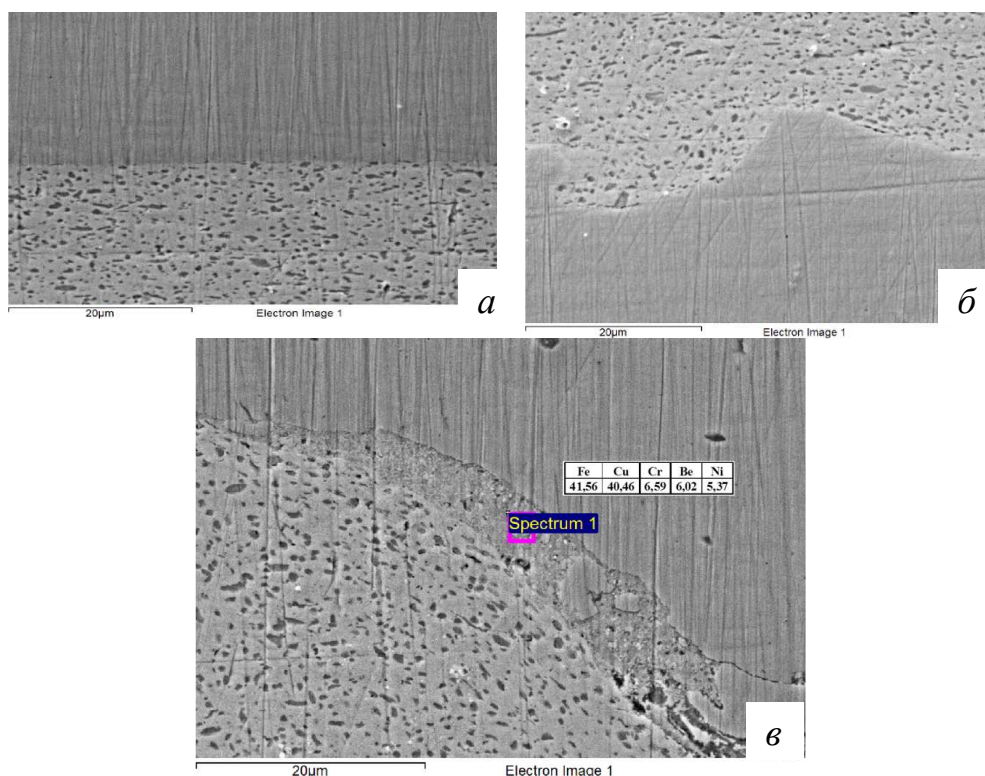


Рис. 38. МРСА зоны соединения композиции III:  
сталь (верх) + БрБНТ1.7 (низ) (а; в) и БрБНТ1.7 (верх) + сталь (низ) (б)

Распределение микротвердости по сечению композиции III после сварки взрывом представлено на рис. 39. При выполнении замеров микротвердость переходной зоны не удалось измерить. Микротвердость бронзы составляет порядка  $300 \text{ HV}_{10}$ , в то время как микротвердость мартенситностареющей стали составляет  $500 \text{ HV}_{10}$ .

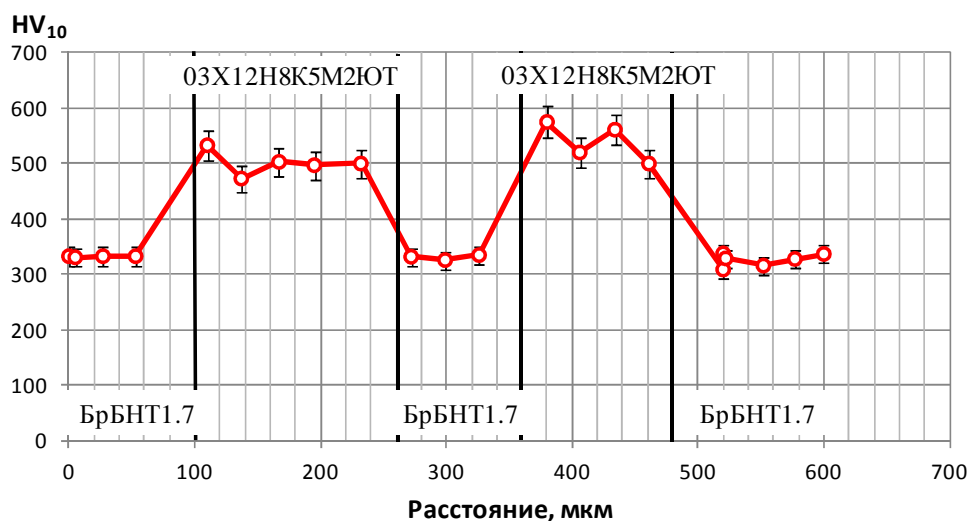


Рис. 39. Распределение микротвердости по сечению композиции III после сварки взрывом



Отжиг композита состава БрБНТ1.7-03Х12Н8К5М2ЮТ в интервале температур 200...500 °С при 1-часовой выдержке не привел к заметным структурным изменениям во всех слоях (рис. 40).

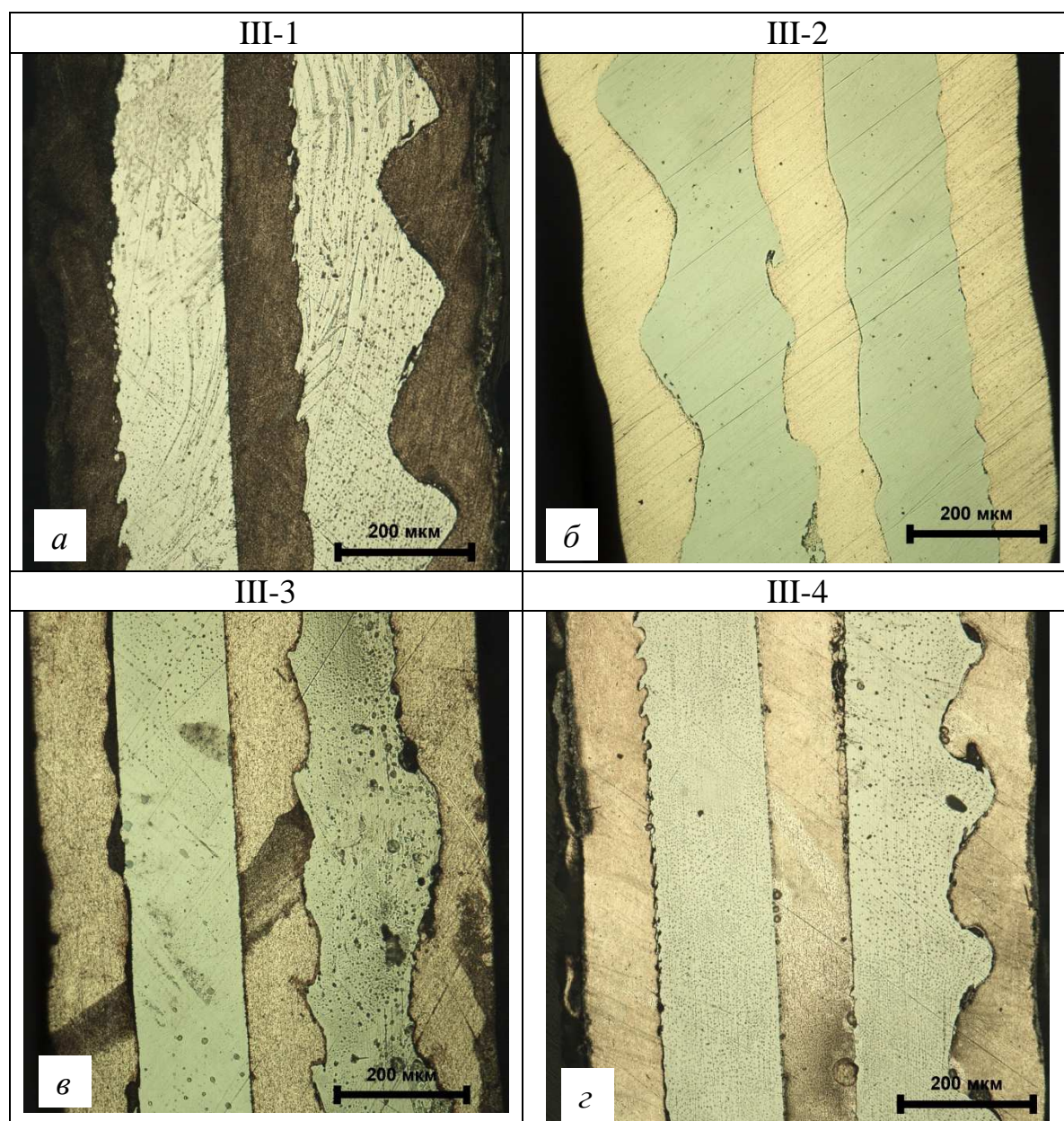


Рис. 40. Микроструктура КМ III после различных термообработок: отжиг на 200°С (а); 300°С (б); 400°С (в) и 500°С (г)

Механические свойства композиции III непосредственно после сварки взрывом (образец III-0) и после отжига на 200°С (III-1) и на 500°С (образец III-4) представлены в табл. 7.

## Механические свойства композита III

Обозначение образца	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
III-0	388	375	5
III-1	556	544	7
III-4	140	113	15

При температуре 200°C произошло старение бериллиевой бронзы с выделением интерметаллидов, а уже при температуре 500°C наблюдали снижение прочностных характеристик в результате перегрева, прошли процессы как перестаривания, так и процессы рекристаллизации.

**Композит IV: 03X12H8K5M2ЮТ – Д16 – 03X12H8K5M2ЮТ**

Трехслойный КМ получен сваркой взрывом пластин из дюрала Д16 и стали 03X12H8K5M2ЮТ толщиной 1 и 0,2 мм соответственно. На рис. 41 приведено поперечное сечение сварного соединения. После сварки взрывом толщины слоев составляли: Д16 – 0,9 мм, сталь 03X12H8K5M2ЮТ – 0,16 мм.

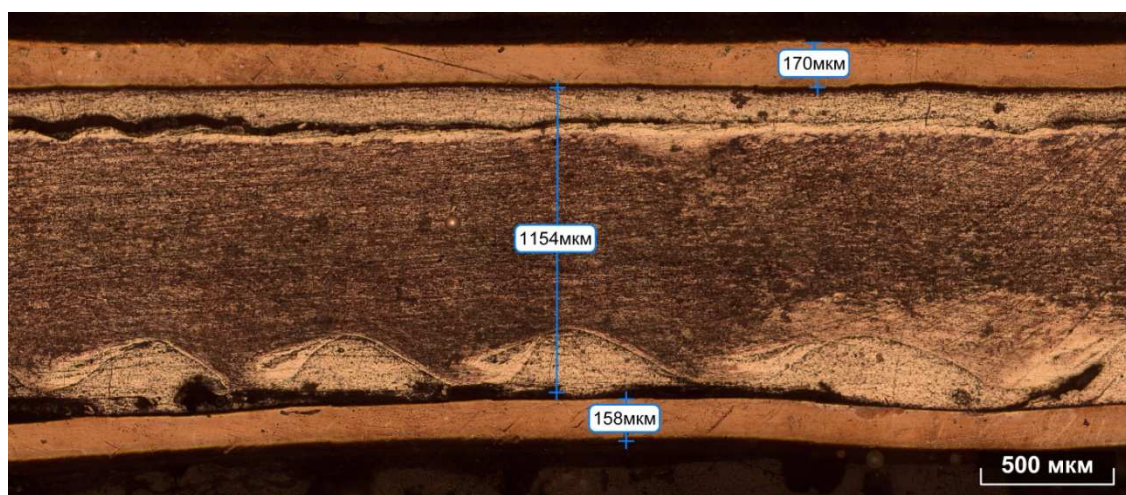


Рис. 41. Микроструктура КМ IV после сварки взрывом

Металлографическим анализом были обнаружены непровары во внутренних слоях. Одной из особенностей сварных швов и прилегающих к ним зон является формирование вихрей на гребнях и впадинах некоторых волн (рис. 42).



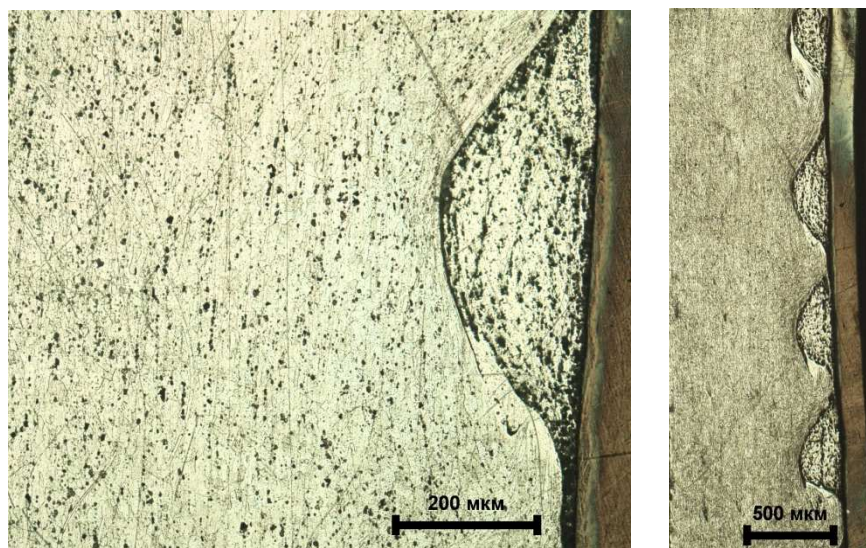


Рис. 42. Зона перемешивания КМ IV

Микрорентгеноспектральный анализ позволил выявить следующие спектральные анализы слоев (рис. 43). На рис. 44, б (Spectrum 2) показана зона перемешивания, имеющая химический состав отличный от химического состава соседних слоев.

Исследование распределения микротвердости по поперечному сечению трехслойной композиции показало, что в зоне перемешивания значения микротвердости ниже, чем у дюрали (рис. 45), порядка 50 HV<sub>10</sub>. Из этого следует, что зона перемешивания несколько обеднена легирующими элементами, дюрали, которая имеет меньшее пересыщение легирующими элементами. Микротвердость дюрали составляет порядка 200 HV<sub>10</sub>, а мартенситносталяющей стали - 500 HV<sub>10</sub>.

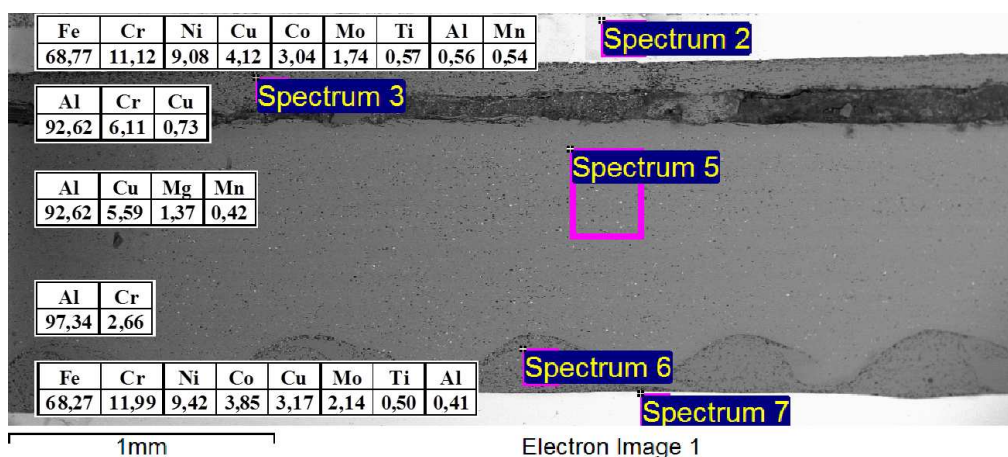


Рис. 43. МРСА КМ IV

Механические свойства композиции IV после сварки взрывом составляют:  $\sigma_B = 571$  МПа,  $\sigma_T = 531$  МПа,  $\delta = 2$  %.

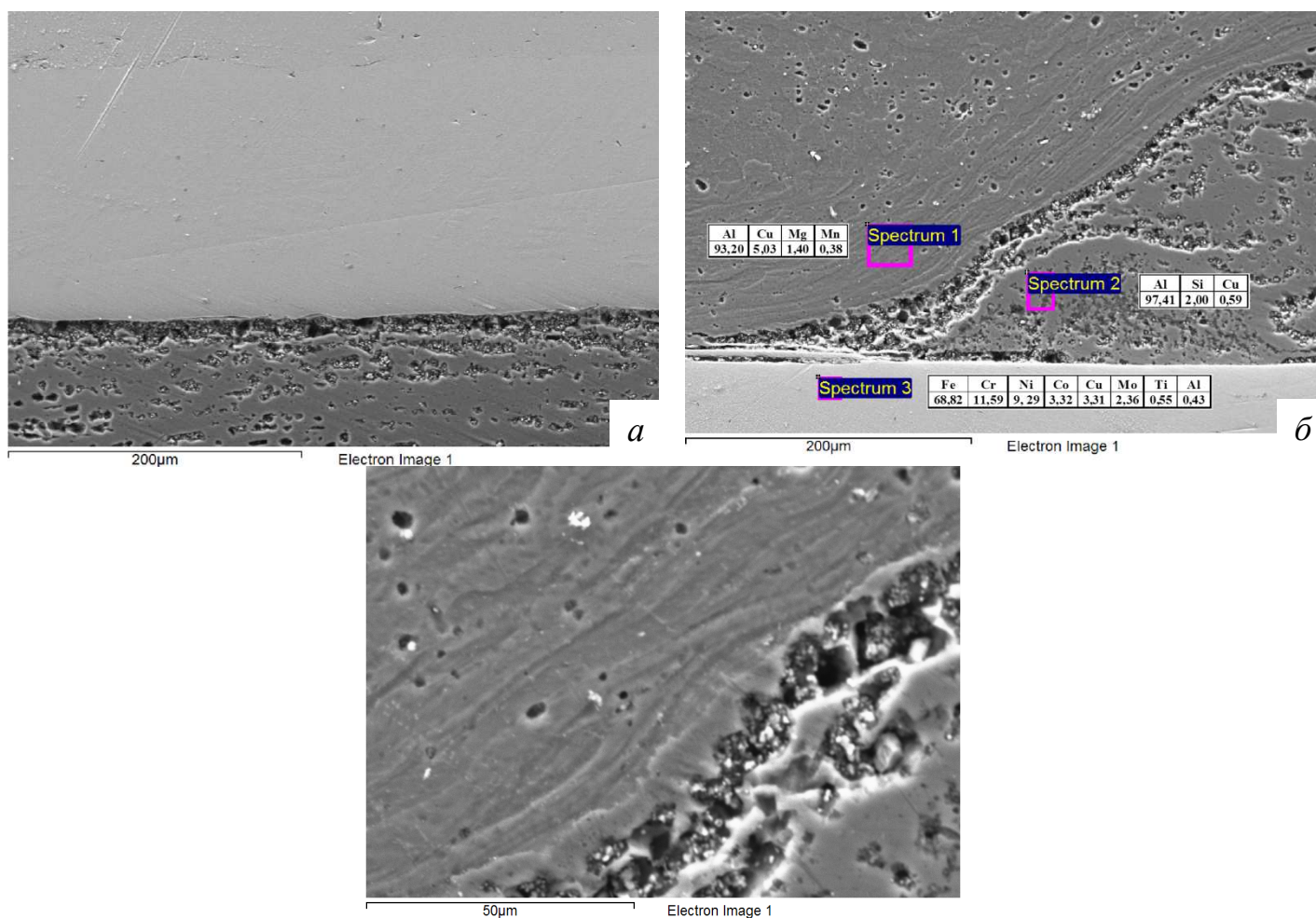


Рис. 44. МРСА зоны перемешивания соединения IV: сталь (верх) + Д16 (низ) (а) и Д16 (верх) + сталь (низ) (б)

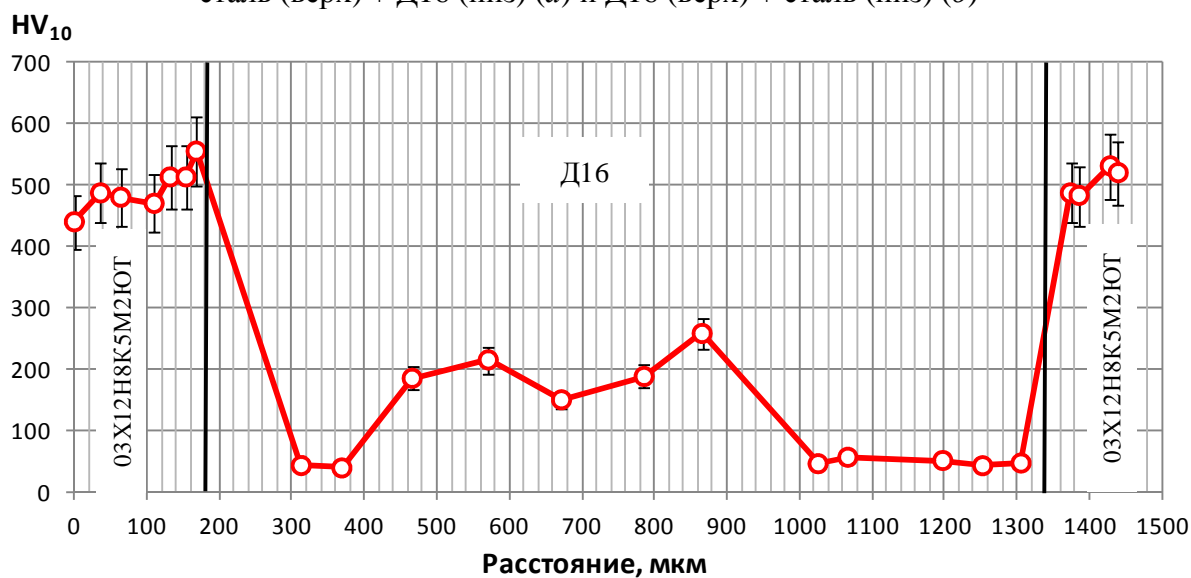


Рис. 45. Распределение микротвердости по сечению композиции IV после сварки взрывом



### **Композит V: 03X12H8K5M2ЮТ – Д16 - 03X12H8K5M2ЮТ**

Трехслойный КМ получен сваркой взрывом пластин из дюрала Д16 и стали 03X12H8K5M2ЮТ толщиной 1 и 0,4 мм соответственно. На рис. 46 приведено поперечное сечение композита, на котором наблюдается чередование полос сваренных материалов. После сварки взрывом толщины слоев составляли: Д16 – 0,9 мм, сталь 03X12H8K5M2ЮТ – 0,37 мм.

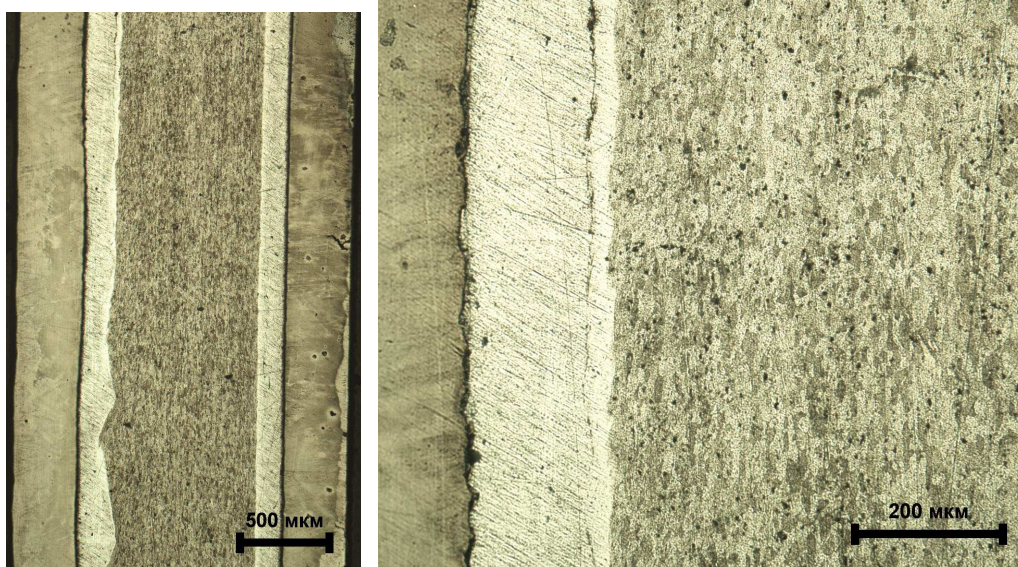
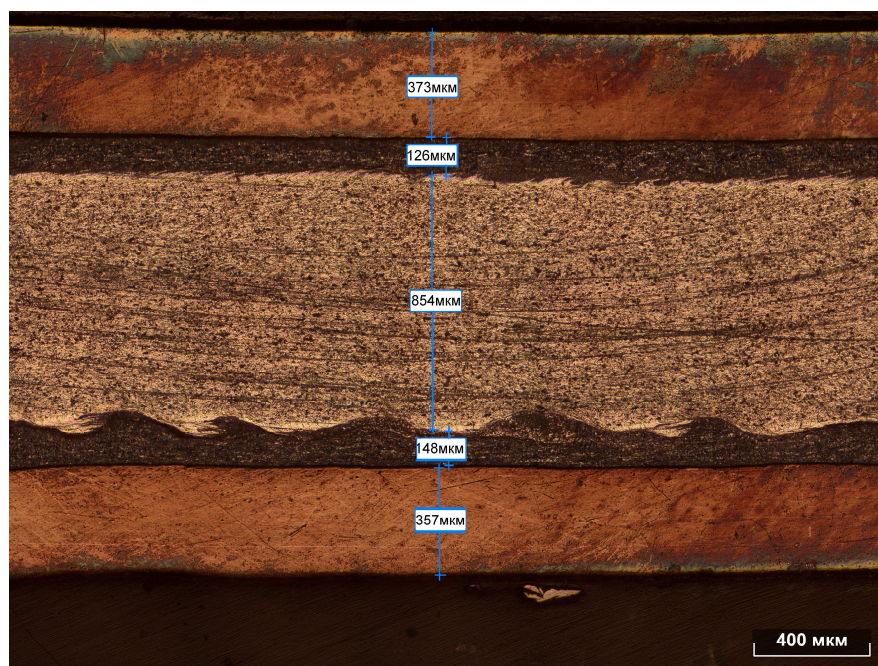


Рис. 46. Микроструктура КМ V после сварки взрывом



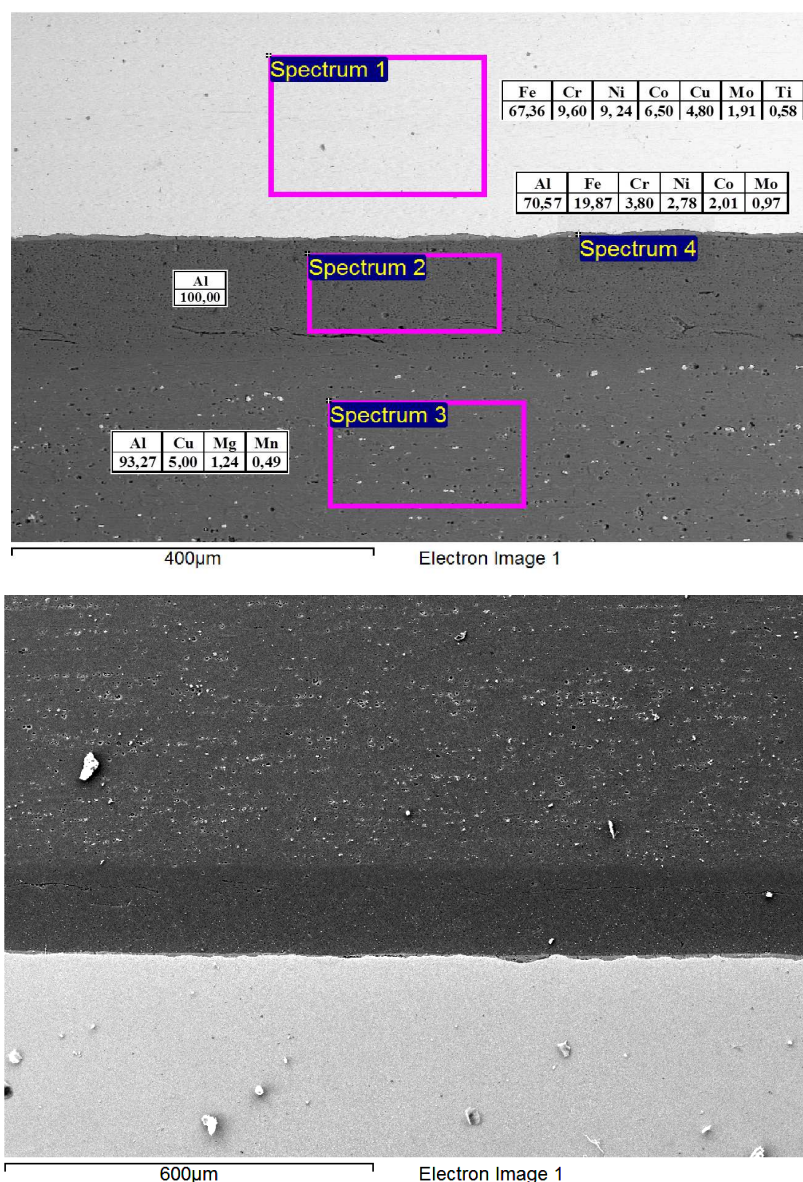


Рис. 47. МРСА KM V

С помощью МРСА как и во II композите была выявлена, по-видимому, интерметаллидная прослойка на границе сталь-алюминий (дюраль). По литературным данным, на начальных стадиях взаимодействия железа и алюминия происходит диффузия железа в алюминий с образованием смеси фаз  $\text{FeAl}_3 + \text{Fe}_2\text{Al}_5$ , в дальнейшем за счет диффузии алюминия в сталь формируется сложная интерметаллидная прослойка, в которой выявляется 2,01 % Co, 2,78 % Ni, 3,80 % Cr и 19,87 % Fe (рис. 47 (Spectrum 4) и рис. 48, а (Spectrum 1)).

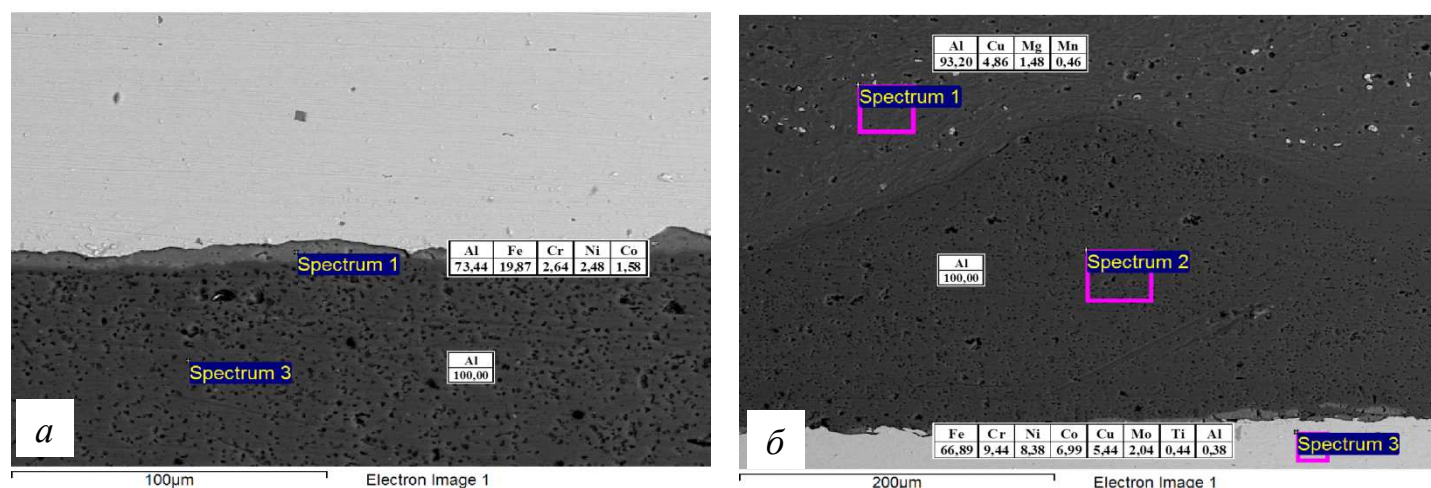


Рис. 48. МРСА КМ V

Микрорентгенспектральным анализом были обнаружены частицы  $\text{CuAl}_2$  (53,93 % (ат.) Al; 42,74 % (ат.) Cu) (рис. 49 Spectrum 2), выделившиеся из дюрэли. Возможность формирования данных частиц связана с разогревом зон сварного шва в процессе сварки взрывом до температур, превышающих температуру старения дюрэли либо в результате локального расплава с последующим выделением из  $\alpha$ -твердого раствора.

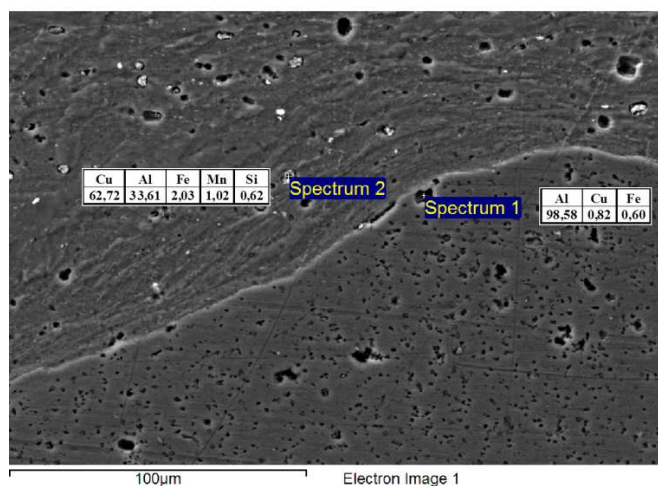


Рис. 49. МРСА КМ V

Распределение микротвердости по сечению композиции V после сварки взрывом представлено на рис. 50. Так же как и в вышеупомянутых сталеалюминиевых композитах микротвердость дюрэли составляет порядка 200  $\text{HV}_{10}$ , в то время как микротвердость мартенситностареющей стали составляет

500 HV<sub>10</sub>. На приграничных участках наблюдается понижение микротвердости в слое дюрали, которое связано с образованием этих оттоженных зон.

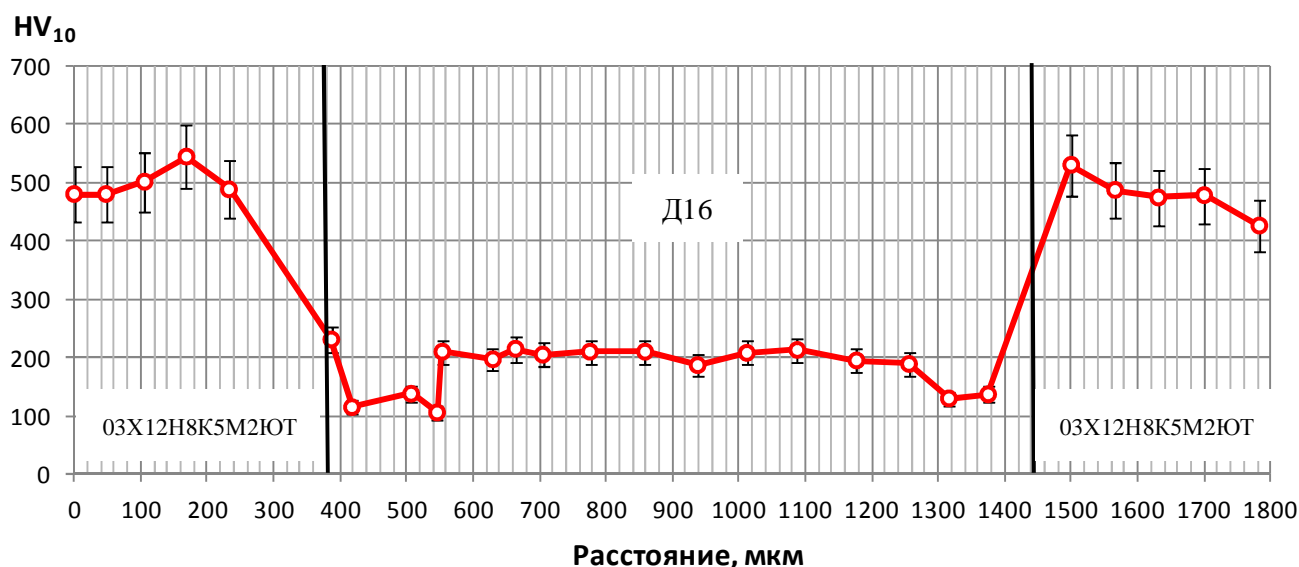


Рис. 50. Распределение микротвердости по сечению композиции V после сварки взрывом

Механические свойства композиции V непосредственно после сварки взрывом (образец V -0) и после отжига на 500°С (образец V-4) представлены в табл. 8.

Таблица 8

Механические свойства композита V

Обозначение образца	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
V-0	576	516	6
V-4	346	-	2

### **Композит VI: 03X12H8K5M2ЮТ – ОТ4-1 – Д16 – ОТ4-1 - 03X12H8K5M2ЮТ**

Пятислойный КМ получен сваркой взрывом пластин из титанового сплава ОТ4-1, алюминиевого сплава Д16 и стали 03X12H8K5M2ЮТ толщиной 1, 1 и 0,2 мм соответственно. На рис. 51 приведено поперечное сечение сварного соединения. Как показали металлографические исследования, вдоль всего профиля соединения металлов имелось хорошее соединение компонентов без пор и несплошностей.



После сварки взрывом толщины слоев составляли: ОТ4-1 – 0,89 мм, Д16 – 0,87 мм, сталь 03Х12Н8К5М2ЮТ – 0,18 мм (рис. 51).

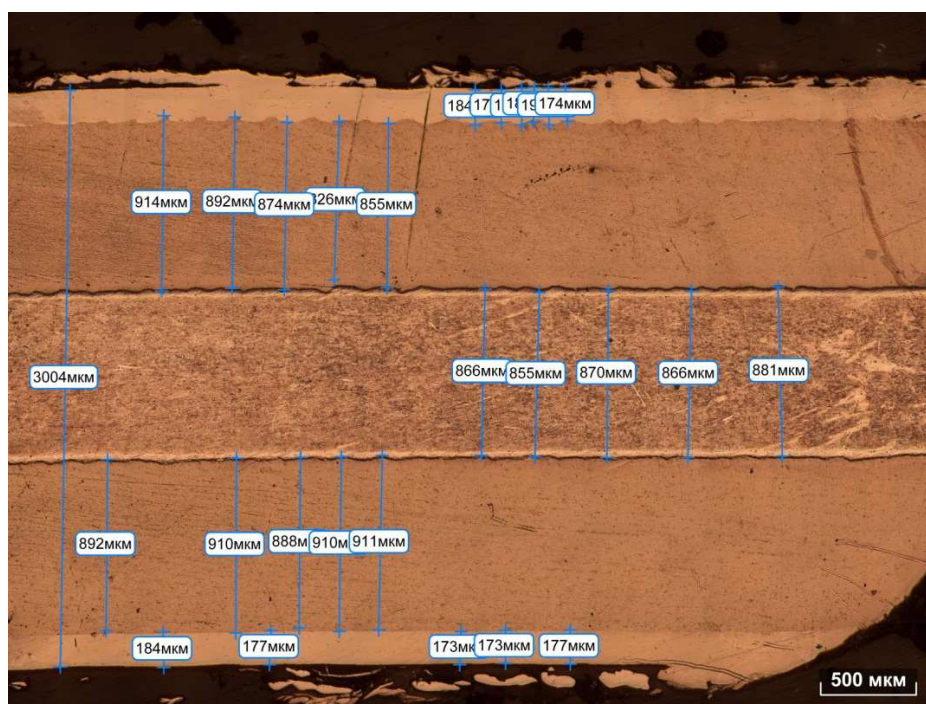


Рис. 51. Микроструктура КМ VI после сварки взрывом

Границы раздела имеют характерную для сварки взрывом волнообразную форму. По мере продвижения от верхних сварных швов к нижним амплитуда и длина волн постепенно уменьшаются. Это связано с тем, что верхние сварные швы подвергаются более интенсивному динамическому нагружению. В поверхностных слоях алюминия происходят процессы полигонизации, обусловленные разогревом локальных участков. Для развития процессов полигонизации в титане температура нагрева была недостаточной.

В данном композите наблюдаемая волнообразность со стороны удара обладает гораздо меньшей амплитудой и длиной волны, чем в рассмотренных ранее композитах.

В процессе сварки взрывом образовалась ровная переходная зона, более светлая, которая также является зоной перемешивания.

С помощью МРСА была исследована структура переходной зоны титан-сталь (рис. 52 и 53).

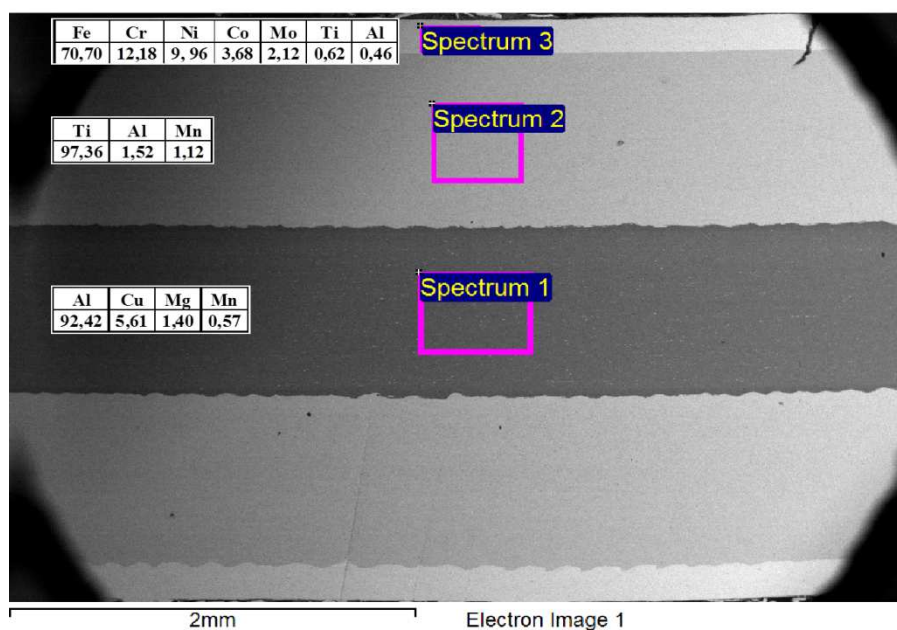


Рис. 52. МРСА KM VI

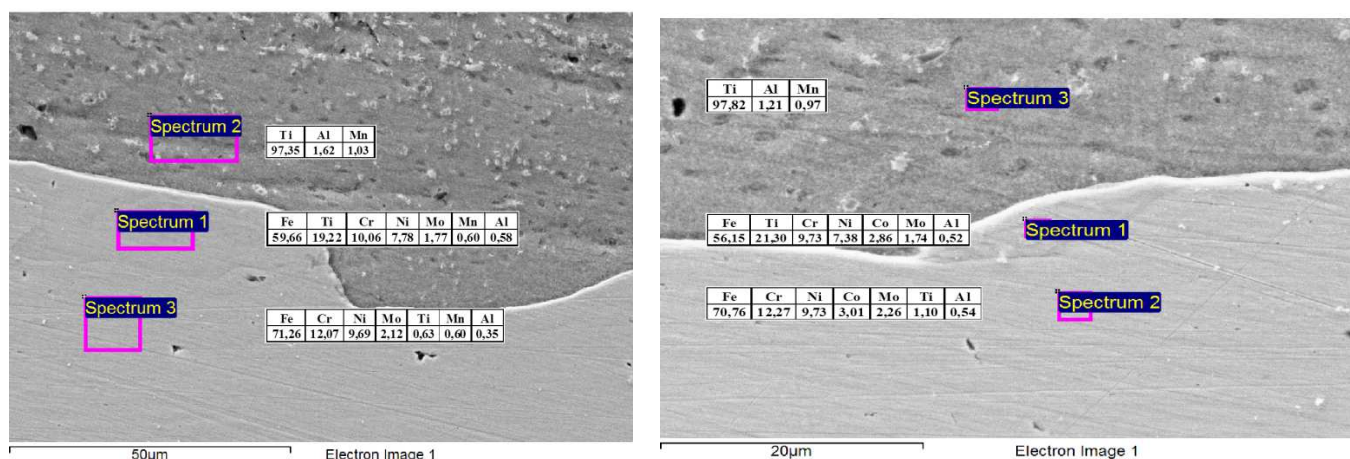


Рис. 53. МРСА зоны соединения композиции VI:  
ОТ4-1 (верх) + сталь (низ)

В результате диффузии в дюрали образовались участки обедненные алюминием (рис. 54 Spectrum 2). Как уже упоминалось выше образование этих зон связано, по-видимому, с процессами локального расплавления и последующей кристаллизации с выделением интерметаллидной фазы, что и приводит к понижению микротвердости данной зоны.

Распределение микротвердости по сечению композиции VI после сварки взрывом представлено на рис. 55. Микротвердость дюрали составляет порядка 200 HV<sub>10</sub>, микротвердость титанового сплава - 300 HV<sub>10</sub>, в то время как микротвердость мартенситносталя составляет 500 HV<sub>10</sub>.



Продольное сечение композита непосредственно после сварки взрывом и после термической обработки приведено на рис. 56 (панорама).

В отожженных слоистых композиционных материалах с увеличением температуры существенных изменений в микроструктуре как наблюдалось и у других композитов не наблюдалось (рис. 57).

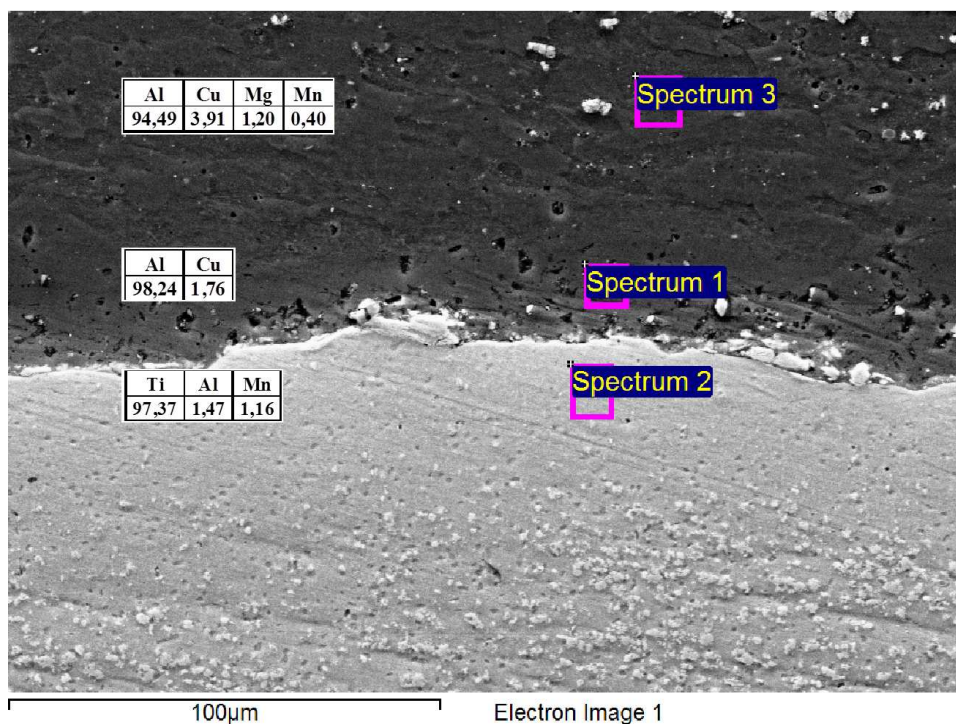


Рис. 54. МРСА зоны соединения композиции VI:  
Д16 (верх) + ОТ4-1 (низ)

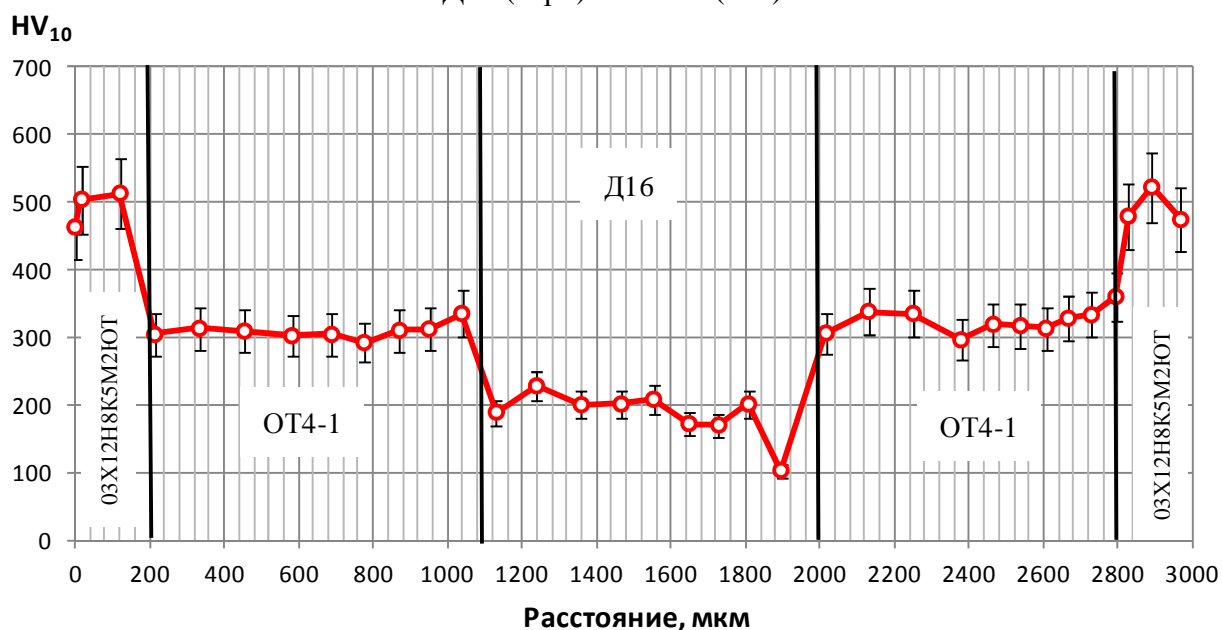


Рис. 55. Распределение микротвердости по сечению композиции VI после сварки взрывом

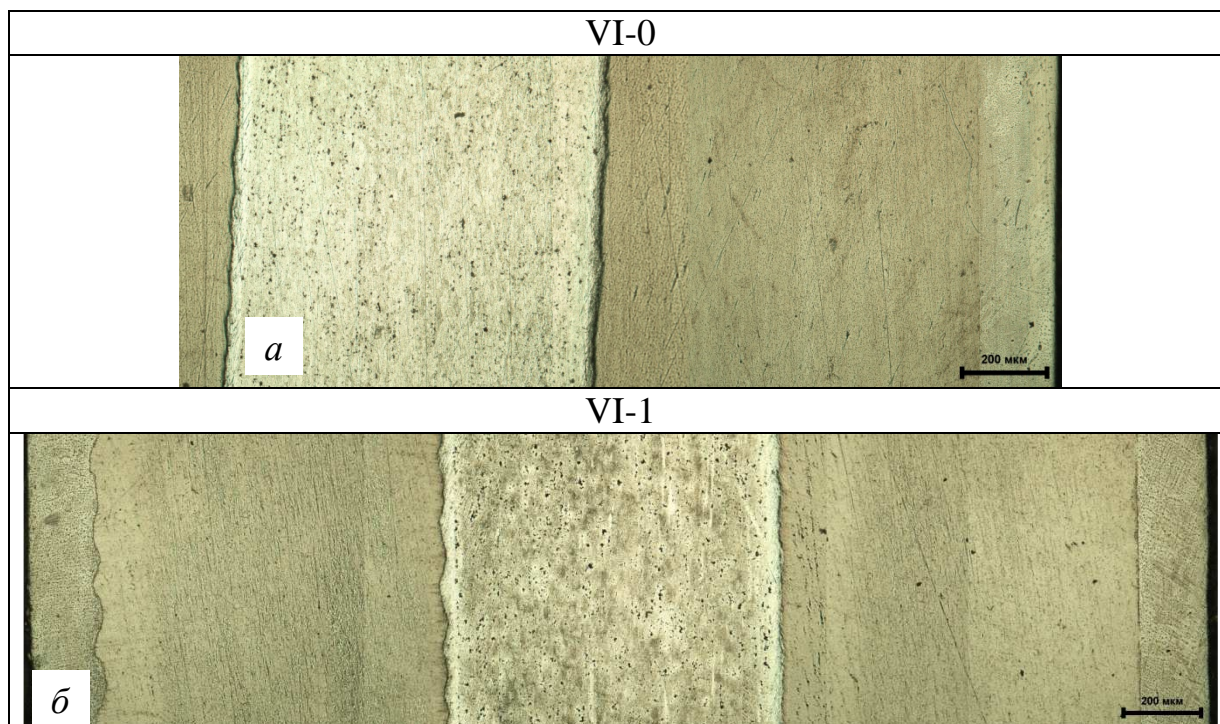


Рис. 56. Микроструктура КМ VI  
после сварки взрывом (а) и после отжига на 200°С (б)

Механические свойства композиции VI непосредственно после сварки взрывом (образец VI -0) и после отжига на 500°С (образец VI-4) представлены в табл. 9.

Таблица 9

Механические свойства композита VI

Обозначение образца	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %
VI-0	682	525	9
VI-4	754	587	7



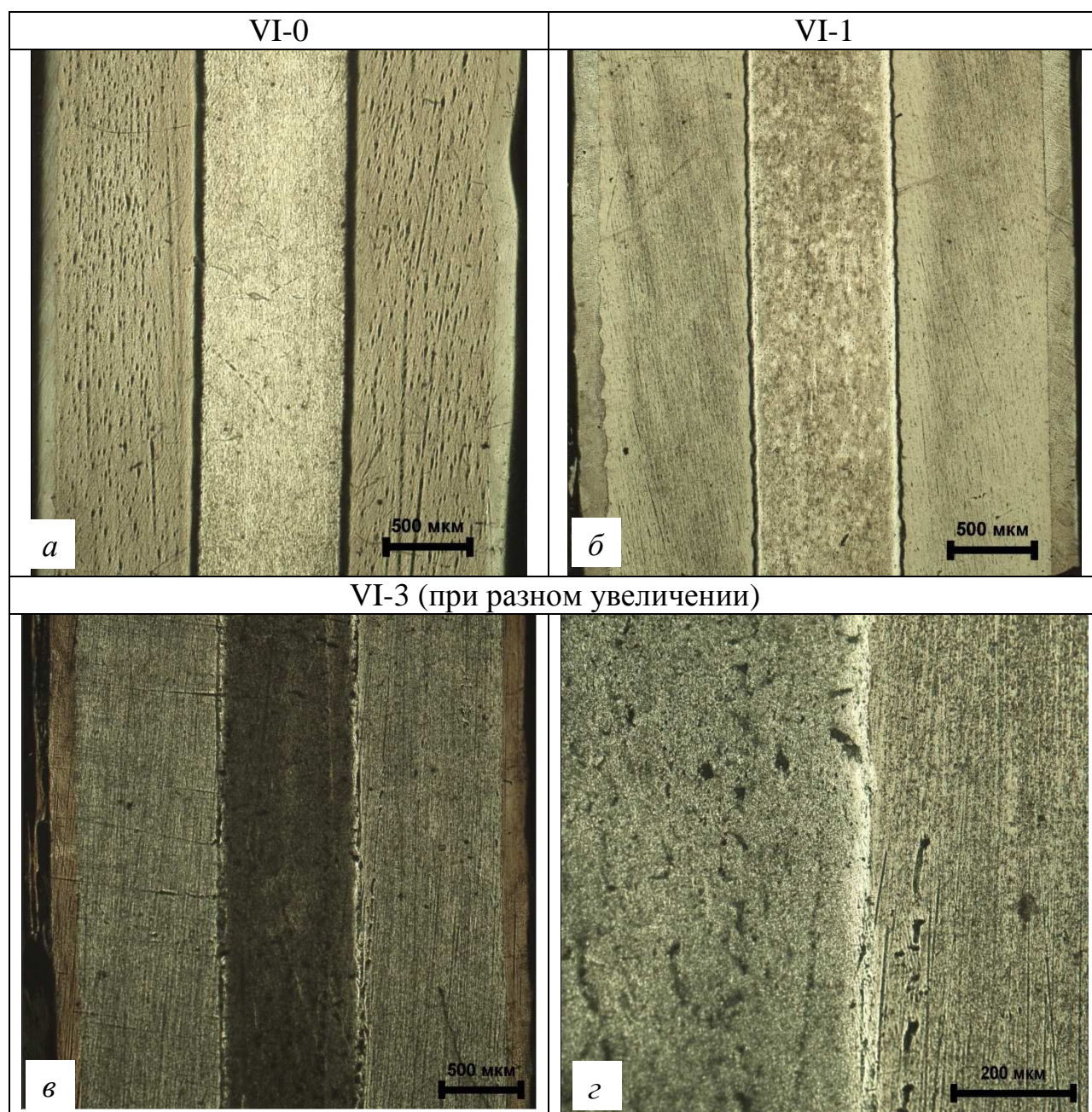


Рис. 57. Микроструктура КМ VI после сварки взрывом (а) и после различных термообработок: отжиг на 200°C (б); 400°C (в; з)

## Заключение

Таким образом, проведенное исследование полученных сваркой взрывом композитов из различных материалов показало, что сварка взрывом является технологическим процессом, позволяющим соединять разнородные материалы. На основании структурных исследований можно сделать вывод о высоком качестве сварных швов. В процессе сварки металлические материалы претерпевают существенные структурные изменения, к которым относится интенсивная пластическая деформация приграничных слоев и образование новых фаз. На границе разнородных материалов в переходной зоне наблюдается интенсивное перемешивание, приводящее к изменению химического состава материала, иногда с образованием новых интерметаллидных фаз.

Изучение структуры и свойств металлических композиционных материалов после различных методов твердофазного совмещения с помощью МРСА, рентгеноструктурного фазового анализа, электронно-микроскопического метода, дилатометрии, ДСК, с привлечением магнитных и физических свойств позволило сделать следующие выводы:

1. Отработан режим сварки, включающий выбор взрывчатого вещества и толщину его слоя, конфигурацию устройства, параметры детонации и соударения.
2. Изучены процессы, протекающие в исследуемых композиционных материалах на межфазных границах.
3. Установлено, что в процессе сварки взрывом через границу раздела происходит интенсивный массоперенос как посредством деформации волнообразования с образованием множества микровыступов одного материала в другой на образующейся волнообразной границе, так и посредством расплавления материалов на границе. Такая закономерность наблюдается в композитах: III, IV, V, VI. А в композитах I и II поверхность границ была практически ровная.

4. Структурные исследования и испытания на перегиб свидетельствуют о высоком качестве сварного соединения. Прочность полученных композитов превышает прочность матриц.
5. МРСА в композите V выявили на межфазной границе между дюралю и сталью кроме зоны перемешивания существование тонкой прослойки интерметаллидного соединения типа  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ , а в слое дюрали наблюдали присутствие интерметаллидной фазы  $\text{CuAl}_2$ , полученной, по-видимому, при кристаллизации зоны расплавления.

## Список использованных источников

- 1 Солнцев Ю.П. Материаловедение / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2004. 736 с.
- 2 Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов [и др.]. М.: Изд-во Высшая школа, 2002. 638 с.
- 3 Материаловедение: учебное пособие / Л.А. Мальцева, М.А. Гервасьев, А.Б. Кутын – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. 339 с.
- 4 Мальцева Л.А. Технологические основы получения порошковых и композиционных материалов: учебное пособие. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. 251 с.
- 5 Т. 4. Композиционные материалы с металлической матрицей / Под ред. К. Крейдера. М.: Машиностроение, 1978. 503 с.
- 6 Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
- 7 Дальский, А.М. Технология конструкционных материалов: учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. – 6 изд. / А.М. Дальский, Т.М. Барсуков. М., 2005. 592 с.
- 8 Композиционные материалы в ракетно-космическом аппарато-строении/ Под общ.ред. Г.П. Гардымова и Е.В. Мешкова. СПб.: СпецЯит, 1999. 271 с.
- 9 Трыков, Ю.П. Влияние пластической деформации на структуру и свойства слоистых композиционных материалов / Ю.П. Трыков, В.Н. Арисова, Л.М. Гуревич [и др.] // Сварочное производство. – 2002. – №6. – С. 11–14.
- 10 Трыков, Ю.П. Структура и свойства сваренных взрывом композитов из разнородных сталей / Ю.П. Трыков, И.Б. Степанищев, А.Ф. Трудов [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2004. – №4. – С. 31 – 33.

- 11 Трыков, Ю.П. О хрупком разрушении сваренных взрывом композиционных соединений / Ю.П. Трыков, Ю.Н. Кусков, Л.М. Гуревич [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2010. - №1. – С. 13-16.
- 12 Трыков, Ю.П. Расчет прочности сваренных взрывом композиционных соединений с механически неоднородными мягкими прослойками / Ю.П. Трыков, Ю.Н. Кусков, Л.М. Гуревич [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2010. - №3. – С. 11-14.
- 13 Трудов, А.Ф. Исследование влияния деформации на структуру и свойства сталеалюминиевого композита / А.Ф. Трудов, Ю.П. Трыков, В.Н. Арисова [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2011. - №11. – С. 44-47.
- 14 Чувичилов, В.А. Исследование структуры и свойств трехслойных медно-стальных и медно-алюминиевых композитов, полученных по батарейной схеме сварки взрывом / В.А. Чувичилов, С.В. Кузьмин, В.И. Лысак [и др.] // Перспективные материалы. – 2010. - №1. – С. 91-96.
- 15 Бесшапошников, Ю.П. К вопросу о выборе режима термообработки крупногабаритного листового биметалла сталь+титан после сварки взрывом / Ю.П. Бесшапошников, В.Е. Кожевников, В.И. Чернухин [и др.] // Известия ВолгГТУ. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. <http://welding.vstu.ru/datas/users/1-bb.pdf> 2010. – Выпуск 4. - №5. - С. 123-132.
- 16 RU 2005104040/02 B23K20/08 20.07.2006. Неразъемное биметаллическое соединение и способ его изготовления
- 17 RU 2270741 C1 B23K20/08, 27.02.2006. Способ сварки взрывом
- 18 RU 2243871 C1 B23K20/08, 10.01.2005. Способ сварки взрывом
- 19 RU 2239528 C1 B23K20/08, 10.11.2004. Способ получения композиционного материала сталь – медь
- 20 RU 2237558 C1 B23K20/08, 10.10.2004. Способ плакирования сваркой взрывом
- 21 RU 2185945 C1 B23K 20/08, 07.02.2001. Способ получения неразъемных соединений сваркой взрывом

- 22 RU 2235627 C1 B23K 20/08, 10.09.2004. Способ получения композиционного материала
- 23 RU 1503185 A1 B23K 20/08, 27.05.1999. Способ сварки взрывом
- 24 Армирование цветных металлов и сплавов волокнами. Колпашников А.И., Мануйлов В.Ф., Ширяев Е.В. М., «Металлургия», 1974. с. 248.
- 25 Композиционные материалы: справочник / под ред. Д.М. Карпиноса. Киев: Наукова думка, 1985. 592 с.
- 26 Процессы обработки металлов взрывом: Учеб. пособие для вузов / А.В. Крупин, С.Н. Калюжин, Е.У. Атабеков и др., М.: Metallurgy, 1996. 336с.
- 27 Металловедение, термообработка и рентгенография: Учебник для вузов. Новиков И.И., Строганов Г.Б., Новиков А.И. М.: «МИСИС», 1994. 480 с.
- 28 Н.Н. Степанова, Методы исследования материалов и процессов: учеб. пособие, Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. 133 с.